

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2026.02.003

ENSO 对西北太平洋台风快速增强位置影响的 年代际变化及机理

何馨¹, 陈旭^{2*}, 郭毅鹏¹

(1. 灾害天气科学与技术全国重点实验室, 中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京大学大气科学学院, 南京, 210023;
2. 大气海洋研究所, 东京大学理学系研究科, 柏市, 日本, 277-8564)

摘要: 不同的厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)事件在衰减阶段表现出显著差异, 其衰减速率的快慢可影响西北太平洋夏季热带气旋快速增强(RI)的发生位置。为了定量刻画 ENSO 衰减阶段的演变特征, 提出新的变量——ENSO 变化率(ENSO Changing Rate, ECR), 并揭示了年代际太平洋涛动(IPO)对 ECR 与 RI 位置关系的调控作用。将 1951—2024 年划分为三个阶段(P1: 1951—1978 年; P2: 1979—1998 年; P3: 1999—2024 年), 结果表明, ECR 与 RI 发生经度的相关性存在明显的年代际变化, 且与 IPO 位相转换同步。在 IPO 负位相(P1, P3 阶段)两者呈显著正相关, 在 IPO 正位相(P2 阶段)则转为负相关。IPO 通过调控 ENSO 衰减速率, 使得西北太平洋大尺度环境因子在 ENSO 衰减年夏季出现不同响应。在 IPO 负位相下, ENSO 事件倾向快速衰减, 西北太平洋西部形成有利于 RI 发生的大气和海洋条件, 因此 ECR 有效调控 RI 发生经度; 在 IPO 正位相下 ENSO 衰减缓慢, 西北太平洋海域大尺度环境抑制 RI, RI 的发生更多取决于移动路径上的环境条件。本研究为 ENSO 对 RI 影响存在年代际调控作用提供机理支撑, 并为发展具有年代际适应性的 RI 季节预报模型提供科学依据。

关键词: 热带气旋, 快速增强, ENSO 衰减阶段, 太平洋年代际涛动

中图分类号: P444

文献标志码: A

Interdecadal modulation on the relationship between ENSO and typhoon rapid intensification occurrences over the Western North Pacific

He Xin¹, Chen Xu^{2*}, Guo Yipeng¹

(1. State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology, Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather/Ministry of Education, School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210023, China;
2. Atmosphere and Ocean Research Institute, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Kashiwa, 277-8564, Japan)

Abstract: Different El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events exhibit pronounced diversity during their decay phases, and the rate of ENSO decay can substantially influence the locations of tropical cyclone (TC) rapid intensification (RI) over the Western North Pacific (WNP) in boreal summer. To quantitatively characterize ENSO evolution during the decay phase, this study introduces a new metric, the ENSO Changing Rate (ECR), and reveals the modulatory role of the Interdecadal Pacific Oscillation (IPO) in the relationship between ECR and RI locations. The period 1951—2024 is divided into three subperiods (P1: 1951—1978, P2: 1979—1998, and P3: 1999—2024). The results show pronounced interdecadal variations in the correlation between ECR and the longitude of RI occurrence, which are synchronized with IPO phase transitions: a significant positive correlation is found during the negative IPO phases (P1 and P3), whereas a negative correlation emerges during the

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(B类)(42322501)

收稿日期: 2026-02-10

* 通信联系人, E-mail: chenx@aori.u-tokyo.ac.jp

positive IPO phase (P2). By modulating the ENSO decay rate, the IPO alters the large-scale atmospheric and oceanic responses over the WNP during ENSO decay summers. During the negative IPO phases, ENSO events tend to decay rapidly, leading to more favorable atmospheric and oceanic conditions for RI over the western WNP, such that ECR effectively regulates the longitude of RI occurrence. In contrast, during the positive IPO phase, ENSO decay is slower and the large-scale environment over the WNP becomes less favorable for RI, with RI locations being more strongly influenced by TC tracks and environmental conditions along the tracks. These results provide physical insight into the interdecadal modulation of ENSO impacts on RI and offer a scientific basis for developing RI seasonal prediction models with interdecadal adaptability.

Keywords: tropical cyclone, rapid intensification, ENSO decaying phase, Interdecadal Pacific Oscillation (IPO)

作为最具破坏性的自然灾害之一,热带气旋(Tropical Cyclone, TC)在西北太平洋的活动最为活跃,每年可能对沿岸国家造成巨大的人员伤亡和经济损失^[1-3]. 近年来,近海发生快速增强(Rapid Intensification, RI)的TC数量显著增加^[4], RI事件因其突发性强、预测难度大,成为气象学界与防灾减灾部门关注的焦点^[5-7]. 因此,深入研究RI的发生机制、提高其预测能力具有非常重要的现实意义^[8-9].

Demaria et al^[5]发现RI事件的发生与大尺度环境因子息息相关,包括较高的对流层中层相对湿度以及较弱的垂直风切变;他们还指出较高的海表面温度、较强的海洋上层热容量是RI发生的关键海洋条件. 其中,海洋条件不仅可直接影响RI过程,还可通过海-气相互作用调节大气环流,从而对RI产生间接作用. 因此,不同时空尺度的海表温度分布型对RI的影响是以往研究的重点内容. 作为热带海洋区域年代际尺度上最显著的信号,厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)可影响全球各个洋盆的TC活动^[10],包括RI事件的发生位置及频数等. 例如, Wang and Chan^[11]的研究表明在El Niño期间,西北太平洋台风生成位置和RI发生位置向东南方向移动,而在La Niña期间,向西北方向偏移. 先前研究还表明,RI发生频数在年代际尺度上与ENSO指数高度相关^[12]. Wang and Zhou^[13]使用六月Niño-3.4指数(Niño_{3.4})对西北太平洋西南区域RI数量进行预报,阐明了ENSO指数可作为RI事件季节预报中的关键因子. 因此有必要深刻理解不同特征的ENSO事件对RI的影响及其相关物理机制.

ENSO事件本身具有显著的多样性和不对称

性,因此其演变过程是以往研究的重要内容^[14-16]. Guo and Tan^[17]发现在不同持续时间的ENSO事件的衰减阶段,大尺度环境条件的演变过程存在显著差异,从而调控RI事件发生的初始位置. 上述研究表明在年际尺度上,ENSO事件的衰减速率可影响RI位置. 然而,ENSO衰减速率与RI发生位置之间的关系具有季节依赖性. Guo and Tan^[18]在后续研究中进一步指出,ENSO与RI经度的关系在秋季较为稳定,但在夏季表现出明显的不稳定性. 上述结果暗示,除年际尺度的ENSO变化外,更长时间尺度的气候背景可能通过调制ENSO的演变特征,从而影响夏季ENSO-RI关系的稳定性. 已有研究表明,西北太平洋TC活动同样受到年代际气候信号的显著调控^[19-22]. 例如, Wang et al^[23]发现,西北太平洋RI发生频数与太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)指数呈显著的年代际负相关关系:在PDO的暖(冷)位相,西北太平洋的RI频数减少(增多),RI的平均位置更偏向东南(西北). Zhao and Wang^[24]进一步指出,自1998年转为PDO冷位相后,RI台风的比例显著增加. 此外, PDO还可通过调制ENSO事件相关的大尺度大气响应,进而影响ENSO对RI发生位置的调控作用. 在PDO暖(冷)位相下,ENSO对赤道太平洋上空大气环流的影响被增强(减弱)^[25]. 因此,有必要从年代际气候背景出发,系统探讨ENSO演变过程对夏季RI发生位置影响的调控机制.

年代际太平洋涛动(Interdecadal Pacific Oscillation, IPO)是太平洋区域最重要的年代际海温变率模态之一,其对ENSO事件及其衰减过程具有显著的调控作用^[26-28]. Liu et al^[29]指出,在IPO

不同位相背景下, ENSO 演变速率存在显著差异. 然而, 现有研究多关注年代际变率信号对 ENSO 演变过程以及 ENSO-TC 活动关系的调控, 缺乏对 IPO 如何调控 ENSO 演变速率与 RI 发生位置之间关系的系统研究. 特别是 ENSO 演变速率与夏季 RI 经度关系所表现出的不稳定性是否与 IPO 位相转换密切相关, 仍有待进一步探讨. 因此, 本研究聚焦 IPO 对 ENSO 变化率与 RI 经度关系的年代际调控机制, 旨在阐明多尺度气候变率的协同影响. 研究结果有望加深对 ENSO 影响夏季 RI 的年代际调控作用的物理认识, 并为台风 RI 的季节预报提供科学依据.

1 数据与分析方法

1.1 数据来源 本研究使用国际气候管理最佳路径档案库第四版(the International Best Track Archive for Climate Stewardship version 4, IB-TrACS V4) TC 最佳路径数据集, 该数据集提供了联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)发布的各 TC 每 3 h 的位置及 10 m 最大持续风速^[30]. 研究选取 1951—2024 年 6—8 月最大强度达到热带风暴等级(最大持续风速 ≥ 34 节)、位于西北太平洋区域($0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)、非温带气旋及副热带气旋状态的 TC 记录.

1951—2024 年月平均海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)数据来源于哈德莱中心海冰与海温的数据集第一版(Hadley Center sea ice and SST version 1, HadISST1)^[31], 其水平分辨率为 1° . 本文用 $Ni\tilde{n}o_{3.4}$ 来区分 ENSO 年份, 该指数定义为 Niño-3.4 区域($5^{\circ}\text{N}\sim 5^{\circ}\text{S}$, $120^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{W}$)内 SST 距平的平均值. 此外, 还使用了欧洲中期天气预报中心第五代再分析数据集(European Center for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis version 5, ERA5)^[32]提供的月平均大气再分析资料, 包括月平均相对湿度(Relative Humidity, RH)和水平风场. 太平洋年代际振荡指数(the Tripole Index for the Interdecadal Pacific Oscillation, 简称“TPI”)数据来源于美国国家海洋和大气管理局物理科学实验室在线数据集(<https://psl.noaa.gov/data/timeseries/IPOTPI/>). 该数据

通过 HadISST1 数据集计算得出, TPI 定义为赤道中太平洋($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{W}$)的 SST 异常, 与西北太平洋($25^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\text{E}\sim 145^{\circ}\text{W}$)及西南太平洋($50^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{S}$, $150^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$)区域平均 SST 异常之差, 用于表征太平洋年代际振荡的位相变化.

月平均海洋温度与三维洋流数据来源于简单海洋数据同化系统(the Simple Ocean Data Assimilation, SODA)第 3.15.2 版^[33], 该版本采用了 ERA5 再分析数据作为背景并提供了 1980—2024 年全球海洋分析数据, 其水平分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$, 垂直分层为 50 层.

1.2 分析方法 RI 定义为 TC 在 24 h 内 10 m 最大持续风速增加至少 30 节($15.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 该阈值对应所有位于洋盆上的 TC 24 h 强度变化值的第 95 个百分点^[34]. 若某个 TC 经历多次 RI 过程, 则在分析中每个独立的 RI 过程均计为一次单独的 RI 事件. 快速增强发生经度是指该快速增强事件发生初始时刻 TC 所在的经度. 对于发生过一次或多次 RI 的 TC 定义为 RI-TC.

本研究引入一个新的 ENSO 指数——ENSO 变化率(ENSO Changing Rate, 简称“ECR”), 用于量化 ENSO 衰减阶段的演变特征. 由于春季是 ENSO 演变过程最为显著的阶段, 因此本研究采用春季(3—5 月)平均 $Ni\tilde{n}o_{3.4}$ 差来表征 ECR. 为了检验该指标定义的稳健性, 还使用了其他时段(2—5 月和 1—5 月)的 $Ni\tilde{n}o_{3.4}$ 变化趋势定义的 ECR, 并在表 1 中展示了不同时段定义下 ECR 与所有 TC 平均生成经度、RI-TC 平均生成经度以及平均 RI 发生经度的相关关系. 结果显示, 不同定义下 ECR 与 RI 发生经度的统计关系具有较好的一致性, 表明 ECR 与 RI 经度之间的关联是稳健的. 3—5 月平均 $Ni\tilde{n}o_{3.4}$ 差的方差最大(0.07), 说明该时段能更清晰地刻画 ENSO 演变过程的年际差异, 且其与 TC 平均生成经度相关性最为显著; 同时, 相较其他两种定义的 ECR, 其与 RI 发生经度的相关性也最高(见表 1).

因此, 本研究采用 3—5 月平均 $Ni\tilde{n}o_{3.4}$ 差来表征 ECR, 其计算方法如下:

$$ECR = \frac{Ni\tilde{n}o_{3.4}(\text{May}) - Ni\tilde{n}o_{3.4}(\text{March})}{2} \quad (1)$$

表1 不同时段定义下ECR与TC生成经度、RI-TC生成经度以及RI发生经度的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between ECR defined over different periods and tropical cyclone mean genesis longitude, RI-TC mean genesis longitude, and RI mean occurrence longitude

<i>Niño</i> _{3.4} 变化趋势	TC生成经度	RI-TC生成经度	RI发生经度
3-5月(方差为0.067)	0.16	0.21*	0.30**
2-5月(方差为0.064)	0.09	0.20*	0.22*
1-5月(方差为0.063)	0.08	0.20*	0.24**

*表示 $p < 0.1$, **表示 $p < 0.05$

热带气旋热势能(Tropical Cyclone Heat Potential, *TCHP*)表示海洋上层水温高于26℃的海水的热含量,其公式如下^[35]:

$$TCHP = C_p \rho \int_{D_{26}}^0 [T(z) - 26] dz \quad (2)$$

*DGPI*计算方法如下^[38]:

$$DGPI = (2 + 0.1V_s)^{-1.7} \left(5.5 - \frac{\partial u_{500}}{\partial y} \right)^{2.3} (5 - 20\omega_{500})^{3.3} (5.5 + |10^5 \eta_{850}|)^{2.4} e^{-11.8} - 1 \quad (4)$$

其中, V_s 为200 hPa与850 hPa之间的垂直风切变, $\frac{\partial u_{500}}{\partial y}$ 表示500 hPa纬向风的经向梯度, ω_{500} 为500 hPa垂直速度, η_{850} 为850 hPa绝对涡度.

本研究选用Lanczos滤波器^[39]对*TPI*进行11年的低通滤波. 该滤波器计算效率高,适用于处理长期气候序列.

2 结果与分析

2.1 ECR与夏季RI经度相关性的年代际变化

为了探讨夏季西北太平洋RI发生位置与传统ENSO指数以及ECR之间的关系,图1展示了1951-2024年夏季(6-8月)西北太平洋区域所有TC平均生成经度、RI-TC平均生成经度、RI平均发生经度以及ENSO锁相期平均*Niño*_{3.4}和ECR的时间序列. 结果表明,西北太平洋所有TC平均生成经度、RI-TC平均生成经度和RI平均发生经度与传统ENSO指数相关性均不显著(图1a, c, e),然而它们与ECR之间的相关性均高于传统ENSO指数. 这说明ENSO成熟期对RI

其中, C_p 为定压比热容,其值为4178 J·kg⁻¹·°C⁻¹; ρ 为海洋上层海水密度,其值为1026 kg·m⁻³; D_{26} 为26℃等温线深度; $T(z)$ 为海洋温度廓线. *TCHP* 用于量化可供TC增强的海洋上层热含量^[36]. 此外,本研究采用U100表示海洋表面至100 m的垂直平均纬向洋流.

为了分析ECR对TC生成环境的调控作用,本研究还计算了Emanuel-Nolan生成潜势指数(Emanuel-Nolan Genesis Potential Index, *ENGPI*)和动力生成潜势指数(Dynamic Genesis Potential Index, *DGPI*). *ENGPI*计算方法如下^[37]:

$$ENGPI = |10^5 \eta|^{\frac{3}{2}} \left(\frac{RH}{50} \right)^3 \left(\frac{PI}{70} \right)^3 (1 + V_s)^{-2} \quad (3)$$

其中, η 为850 hPa绝对涡度, RH 为600 hPa相对湿度, PI 为潜在强度, V_s 表示200 hPa与850 hPa之间的垂直风切变.

发生经度的影响弱于不同ENSO衰减阶段的影响,ECR作为RI经度季节预报的预测因子相较传统ENSO指数更具潜力. 所有TC的平均生成经度与ECR之间存在显著正相关关系($r=0.30$, $p < 0.01$, 图1b). 该结果与现有观测研究一致:在快速衰减型La Niña事件次年的夏季,TC生成位置相较缓慢衰减型La Niña偏东^[40];快速衰减型El Niño次年夏季,TC生成位置相较缓慢衰减型El Niño偏西^[41]. 相比之下,RI-TC平均生成经度与ECR之间的相关性明显偏弱($r=0.21$, $p < 0.1$, 图1d),表明尽管ECR能够显著调制整体TC的生成位置,但其对最终发生RI的TC生成位置的影响相对有限. 进一步分析发现,西北太平洋RI平均发生经度与ECR之间并不存在显著相关关系($r=0.16$, $p > 0.1$, 图1f). 这意味着RI的发生位置并非简单地由TC生成阶段所对应的大尺度环境条件所决定,而更可能受到TC生成后的移动路径特征及其沿路径所经历的环境因子(如垂直风切变和海洋热含量等)的共同调控.

考虑到ENSO与RI活动可能受到IPO等年

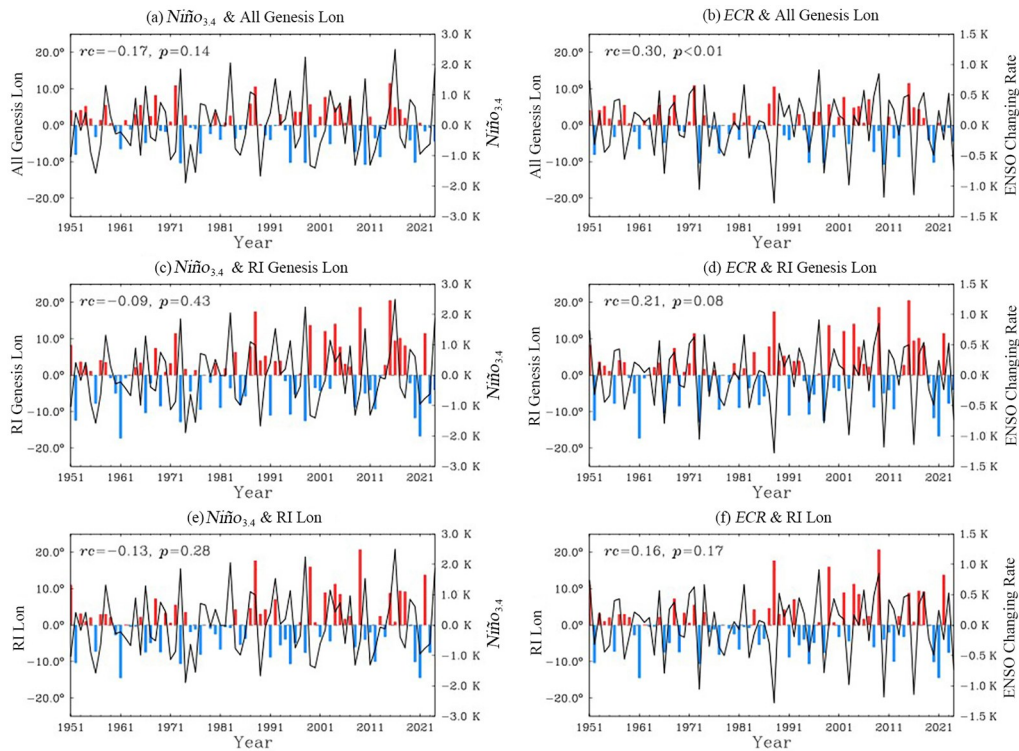


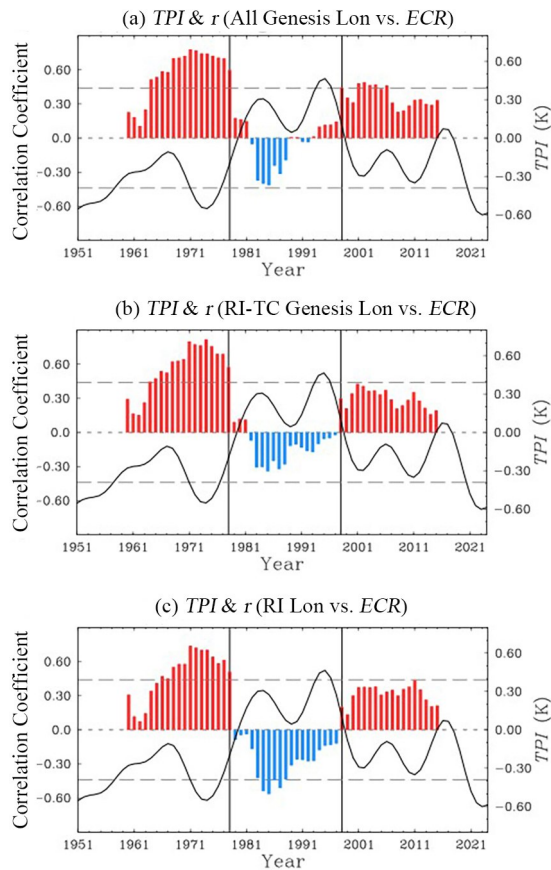
图1 1951–2024年6–8月西北太平洋(a)所有热带气旋平均生成经度、(c) RI-TC平均生成经度、(e) RI平均发生经度 (柱状), 以及其对应的 ENSO 锁相期平均 $Ni\tilde{n}o_{3.4}$ (折线); (b, d, f) 与 (a, c, e) 相同 (柱状), 但对应的是 ECR (折线)
Fig. 1 The time series of (a) tropical cyclone mean genesis longitude, (c) RI-TC mean genesis longitude, and (e) RI mean occurrence longitude (bars) over the western North Pacific during summer, and the ENSO phase-locking mean $Ni\tilde{n}o_{3.4}$ (line) from 1951 to 2024; panels (b, d, f) are the same as (a, c, e) (bars), respectively, but for ECR (line)

际气候信号的调控, 本文进一步分析 RI 发生经度与 ECR 之间的相关性是否存在年代际尺度变化. 图 2 给出了表征 IPO 位相变化的 TPI 以及 RI 平均发生经度、RI-TC 平均生成经度及所有 TC 平均生成经度与 ECR 的 19 年滑动相关系数. 结果表明, 上述三者与 ECR 的相关性均呈现明显的年代际波动特征, 并与 IPO 位相转换具有较好的一致性. 在 IPO 负位相期间, ECR 与所有 TC 平均生成经度、RI-TC 平均生成经度以及 RI 平均发生经度均表现为正相关(图 2). 其中, ECR 与 RI 平均发生经度的相关性表现出最显著的年代际变率, 当 IPO 由负位相转为正位相后, ECR 与 RI 平均发生经度的相关性由显著正相关转为显著负相关, 而 ECR 与 RI-TC 平均生成经度及所有 TC 平均生成经度之间的正相关性明显减弱, 部分时段转为较弱的负相关. 需要指出的是, 尽管在 P1 和 P3 阶段 ECR 与 RI 发生经度整体呈正相关, 但 P2

阶段部分滑动窗口未通过 95% 显著性检验. 这表明 ECR-RI 关系除年代际变化外, 可能还受到长期趋势等气候信号的影响, 从而在 2000 年以后对原有正相关关系产生一定削弱, 导致其统计显著性下降. 然而, 该特征并不改变本文的总体结论, 即 IPO 对 ECR 与 RI 发生经度之间的关系具有显著的年代际调控作用. 相比之下, IPO 对 ECR 与 TC 生成经度关系的调控作用相对较弱, 并表现出一定的滞后特征.

2.2 不同时段 ENSO 变化率对大尺度环境的影响

为了进一步探讨 ECR 与 RI 发生经度年代际变率的成因, 本文综合考虑 IPO 位相转换特征及 ECR 与 RI 经度相关性的年代际差异, 将研究时段划分为三个阶段: P1 (1951–1978 年), P2 (1979–1998 年) 以及 P3 (1999–2024 年). 在 ENSO 成熟期 (通常指前一冬季) 之后, 若次年 ECR 与成熟期平均 $Ni\tilde{n}o_{3.4}$ 符号相反, 则该年份定



The gray dashed line indicates the 95% significance level. The black solid lines mark the years when the running correlations between *ECR* and the RI mean occurrence longitude change sign (1978 and 1999).

图2 1951–2024年6–8月西北太平洋(a)所有热带气旋平均生成经度、(b) RI-TC平均生成经度、(c) RI平均发生经度与*ECR*的19年滑动相关系数(柱状;图中横坐标表示19年滑动窗口的中心年份),以及其对应的*TPI*指数(曲线)

Fig. 2 19-year running correlations between the *ECR* and (a) the mean genesis longitude of all TCs, (b) the mean genesis longitude of RI-TCs, and (c) the mean longitude of RI occurrence over the western North Pacific in June–August from 1951 to 2024 (bars; the *x*-axis denotes the central year of each 19-year window), together with the corresponding *TPI* (curve)

义为 ENSO 衰减年份(表 2)。下文将重点分析 ENSO 衰减年夏季西北太平洋 TC 活动的年代际差异。

为了进一步分析导致 RI 发生经度偏移的相关因素,比较了不同阶段、不同 ENSO 衰减年份

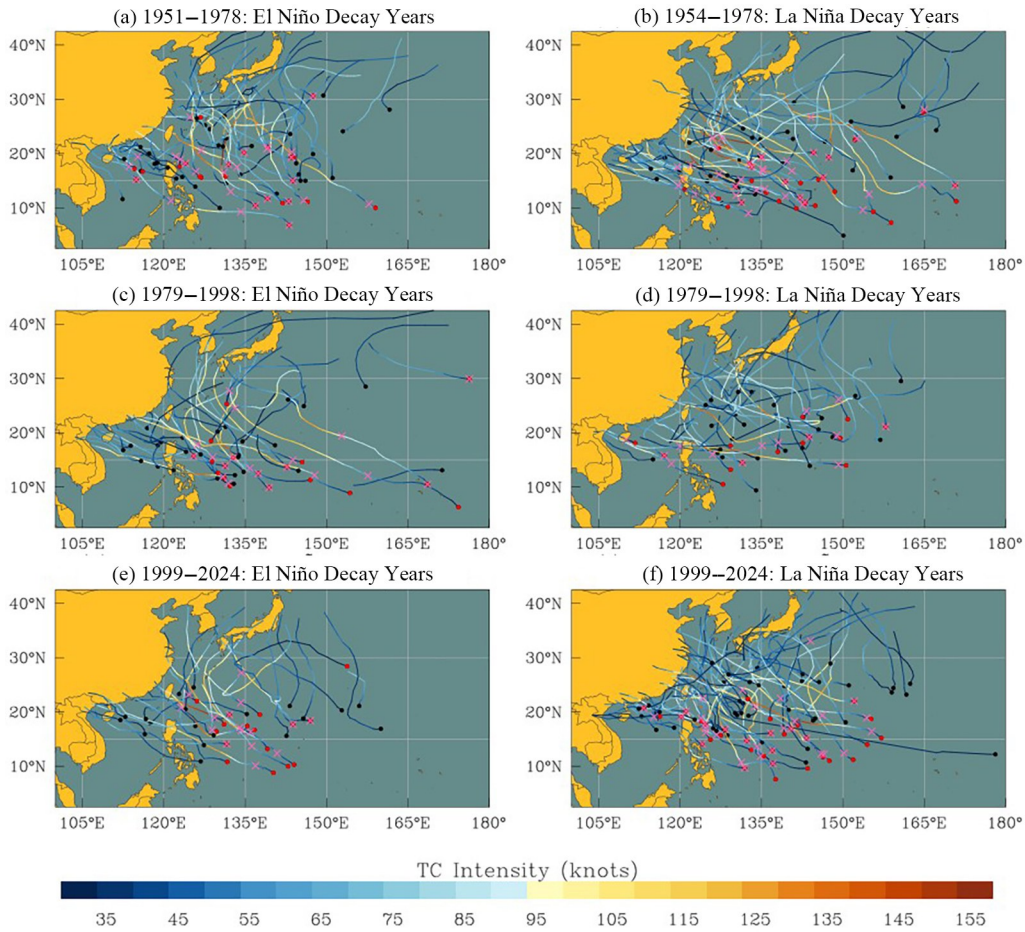
表 2 不同阶段 ENSO 衰减年份

Table 2 Different ENSO decaying years under different phases

阶段	ENSO	衰减年份
P1 (1951–1978)	El Niño	1952, 1958, 1966, 1970, 1973, 1978
	La Niña	1956, 1965, 1971, 1972, 1974, 1976
P2 (1979–1998)	El Niño	1983, 1987, 1992, 1995, 1998
	La Niña	1985, 1986, 1989, 1996
P3 (1999–2024)	El Niño	2003, 2007, 2010, 2016, 2019, 2020
	La Niña	2000, 2001, 2006, 2008, 2011, 2012, 2018, 2021, 2023

下 TC 的生成位置、TC 移动路径及 RI 发生位置(图 3)。在 IPO 负位相阶段(P1 和 P3), El Niño 衰减年夏季($ECR < 0$) RI 发生经度及 TC 生成经度整体偏西,而在 La Niña 衰减年夏季($ECR > 0$)中则相对偏东(图 3)。这一特征与 *ECR* 与 RI 发生经度及 TC 生成经度呈正相关的结果一致(图 2)。相比之下,在 IPO 正位相阶段(P2), RI 发生经度在 El Niño 衰减年夏季相较 La Niña 衰减年夏季整体偏东,与该阶段 *ECR* 与 RI 发生经度呈负相关的特征相一致。从空间分布一致性来看,在 P1 和 P3 阶段, RI 发生位置与 RI-TC 生成位置在空间上具有较高的一致性, RI 事件多发生在其生成位置附近。然而,在 IPO 正位相(P2),这种一致性明显减弱, RI 发生位置相对于生成位置的距离显著增大,尤其在 El Niño 衰减年夏季, RI 平均发生位置偏向 RI-TC 平均生成位置以东。上述结果表明, TC 生成位置对 RI 发生位置具有一定的空间影响,但该作用随 IPO 位相而变化,在 IPO 负位相阶段(P1 和 P3)较为显著,而在 IPO 正位相阶段(P2)明显减弱。

为了进一步探究 *ECR* 的潜在影响,本文分别分析了 P1, P2 和 P3 阶段两种 TC 生成潜势指数(*ENGPI* 和 *DGPI*)与 *ECR* 的相关系数空间分布(图 4)。结果表明,在 IPO 负位相阶段(P1 和 P3), *ECR* 与 *ENGPI* 及 *DGPI* 在西北太平洋 150°E 以东区域呈显著正相关(图 4a, b, e, f), 该特征表明,在 El Niño 快速衰减年份,西北太平洋东部海域的热力和动力环境条件整体趋于抑制该区域 TC 生成,并使 TC 的平均生成位置偏向西部海域。相应地, RI-TC 的生成位置及 RI 发生位置表现出西移



Black and red dots denote the genesis locations of TCs without and with RI, respectively, while pink crosses indicate the locations of RI occurrence.

图 3 P1 阶段 (a) El Niño 和 (b) La Niña 衰减年 6-8 月所有 TC 的生成位置 (圆点)、RI 发生位置 (叉号)、路径和强度 (填色); (c, d) 和 (e, f) 相同, 但分别是 P2 和 P3 阶段

Fig. 3 Locations of TC genesis (dots), rapid intensification (RI) occurrence (crosses), and their tracks and intensity (shading) from June to August for (a) El Niño and (b) La Niña decay years in the P1 phase; panels (c, d) and (e, f) are the same as (a, b), but for the P2 and P3 phases, respectively

特征, 这与 Guo and Tan^[17] 的研究结果一致; 并且, 在 La Niña 快速衰减年, RI 发生经度相对东移. 因此, 在 IPO 负位相条件下, ECR 通过影响 TC 生成环境及其生成位置的空间分布, 间接影响 RI 发生经度, 使二者呈现正相关关系 (图 2).

在 P2 阶段, ECR 与 ENGPI 和 DGPI 的相关性空间分布与 P1 和 P3 阶段存在显著差异. ECR 与 ENGPI 和 DGPI 在西北太平洋 130°E 以东海域均显著正相关, 这意味着在 El Niño 衰减年, P2 阶段相较 P1 和 P3 阶段形成范围更广阔的不利于 TC 生成和发展的环境 (图 4). 同时, ECR 与 DG-

PI 在西北太平洋西部仍呈显著正相关 (图 4d), 表明在 El Niño 快速衰减年夏季, TC 生成附近的环境条件并不足以以为 RI 发展提供有利的热力支持, 甚至对 RI 发生形成抑制. 因此, ECR 在 P2 阶段对 RI 发生经度的影响明显减弱, 二者相关性随之下降. 在 P2 阶段, ECR 对 TC 生成环境的影响方式发生改变, 其对后续 TC 发展以及 RI 发生位置的空间约束减弱, TC 生成位置与 RI 发生位置之间的距离显著增加 (图 3c 和图 3d). 因此, RI 发生位置在 P2 阶段可能更多受 TC 生成后移动路径上的大尺度环境条件控制. 下一节将进一步对比

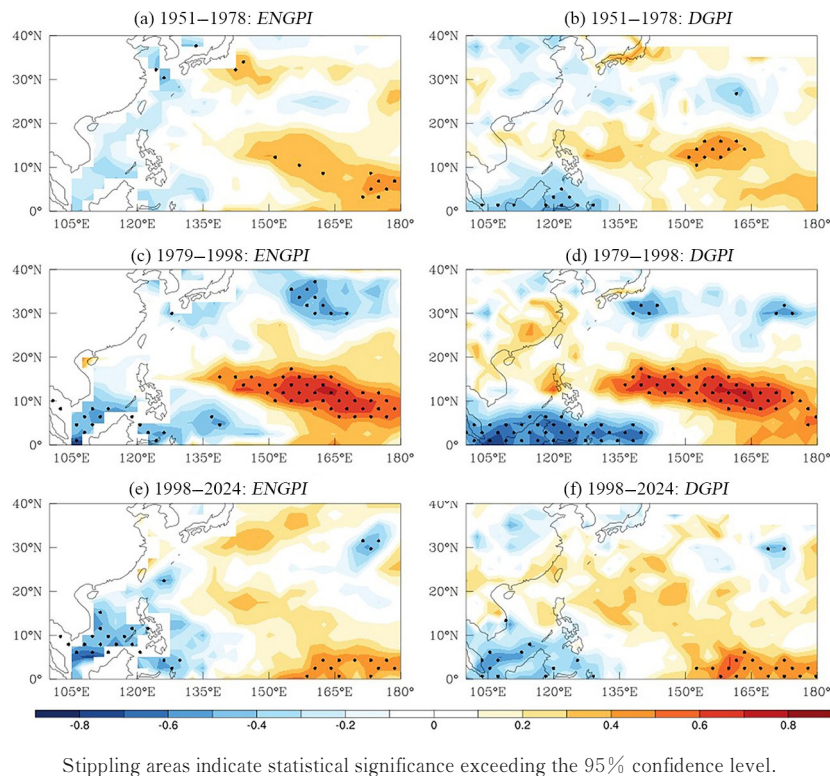


图4 (a~b) P1阶段、(c~d) P2阶段和(e~f) P3阶段 ENSO变化率与 Emanuel-Nolan 生成潜势指数和动力生成潜势指数的相关系数空间分布(填色)

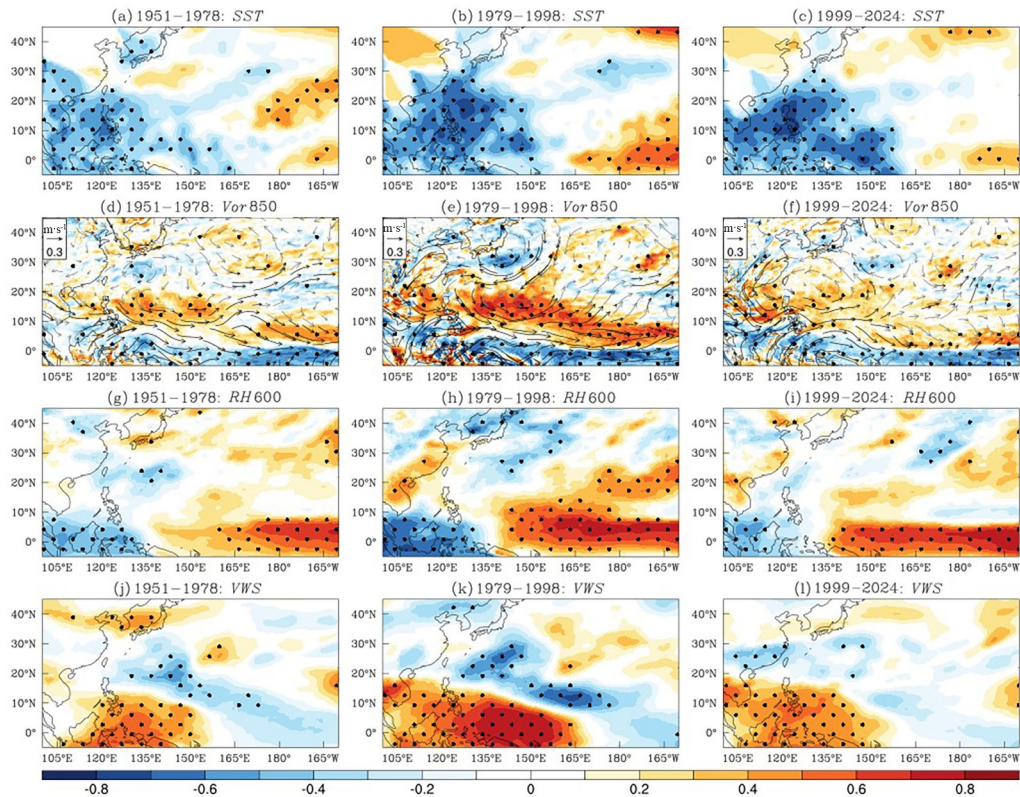
Fig. 4 Spatial distributions of correlation coefficients between *ECR* and the Emanuel-Nolan genesis potential index and the dynamic genesis potential index (shading) during the (a~b) P1, (c~d) P2, and (e~f) P3 phases

分析 P2 阶段与 P1 和 P3 阶段大尺度环境因子对 *ECR* 的响应差异,以阐明 *ECR* 与 RI 发生经度关系产生年代际变率的物理机制。

2.3 IPO 对 *ECR* 和 RI 关系的调控作用 为了探讨 IPO 对 *ECR* 与 RI 发生经度关系的调控机制,进一步分析不同 IPO 位相背景下, *ECR* 与影响 TC 生成及 RI 发生的主要环境因子的空间相关性(图 5)。在 IPO 负位相, *ECR* 与各环境因子的相关性空间分布具有较高一致性(图 5)。在西北太平洋西南部海域, *ECR* 与 *SST* 和 *RH* 呈显著负相关(图 5a, c, g, i), 而与垂直风切变 (Vertical Wind Shear, *VWS*) 呈显著正相关(图 5j, l)。上述特征表明, 在 El Niño 快速衰减阶段 ($ECR < 0$), 西北太平洋西部海域易出现偏暖的 *SST*、更湿润的中层大气以及较弱的 *VWS*, 这些大尺度环境条件整体上有利于 TC 生成及其快速增强。同时, 在西北太平洋的 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}N$ 近海区域, *ECR* 与低层绝对涡度呈显著正相关(图 5d), 表明 El Niño 快速

衰减期间该区域低层存在反气旋性涡度异常。该异常在一定程度上抑制 TC 生成, 但可能有助于维持更大尺度上相对稳定、垂直风切变较弱的环境, 从而使在该区域生成的 TC 更易在近海迅速增强。上述环境因子的协同变化有助于解释在 IPO 负位相阶段, TC 生成位置及 RI 发生位置整体西移, 从而导致 *ECR* 与 RI 发生经度呈正相关关系(图 2a)。

相比之下, 在 IPO 正位相阶段, *ECR* 与 *VWS* 在菲律宾海东北部至日本以南的广阔区域呈显著负相关(图 5k), 表明 El Niño 快速衰减年该区域 *VWS* 增强, 从而抑制 RI 发生。同时, *ECR* 与中层 *RH* 在菲律宾海一带呈显著正相关(图 5h), 表明 El Niño 衰减阶段西北太平洋整体缺乏有利于 RI 发生的水汽条件, 低层涡度同样表现为更强的反气旋性异常(图 5e)。因此, 在 IPO 正位相下, ENSO 快速衰减所激发的大尺度环流与热力响应不利于西北太平洋西部 RI 的发生, 负 *ECR* 对 RI 发



Stippling areas and black wind vectors indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level.

图5 ECR与(a~c) SST、(d~f) 850 hPa绝对涡度、(g~i) 600 hPa相对湿度及(j~l)垂直风切变在P1-P3阶段的相关系数空间分布(填色), (d~f)叠加了850 hPa水平风场对ECR的回归空间分布(矢量)

Fig. 5 Spatial distributions of correlation coefficients between ECR and (a~c) SST, (d~f) 850 hPa absolute vorticity, (g~i) 600 hPa relative humidity, and (j~l) vertical wind shear during P1-P3 (shading), vectors in (d~f) denote the 850 hPa horizontal wind regressed onto ECR

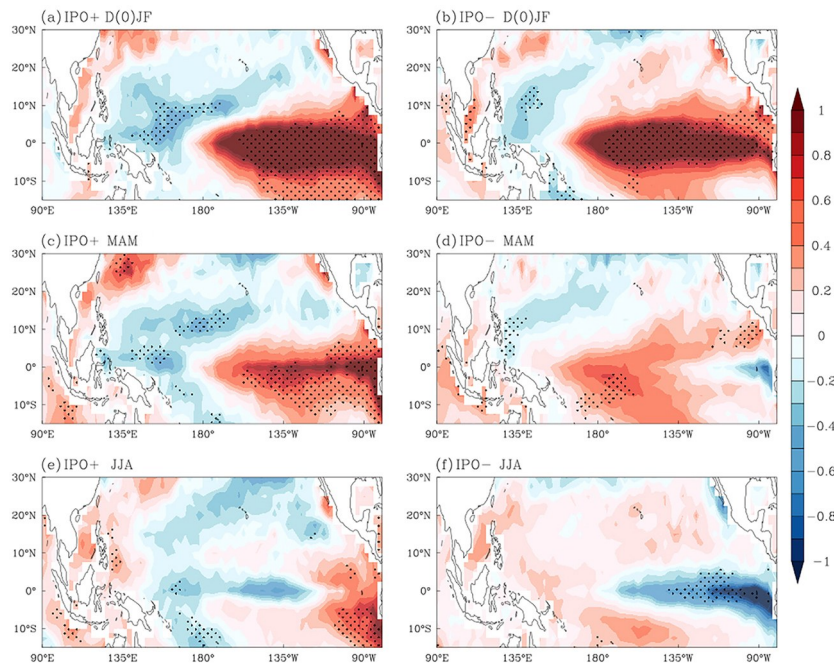
生位置西移的调控作用明显减弱。

综上, IPO通过调控 ENSO 衰减过程中大尺度环境因子对衰减速率的响应, 实现其对 ECR 与 RI 发生经度关系的年代际调控。在 IPO 负位相 (P1, P3) 下, El Niño 衰减年夏季西北太平洋西部的热力与动力条件整体有利于 RI 西移; 在 IPO 正位相 (P2) 下, El Niño 衰减年西北太平洋西部环境不利于 RI 发生, 从而削弱并破坏了 ECR 与 RI 发生经度之间的关系。

不同 ENSO 衰减阶段, 大尺度环境演变过程存在显著差异。El Niño 快速衰减年夏季的大气环流结构与 La Niña 衰减年夏季明显不同, 同时, 在 IPO 正、负位相主导下, El Niño (La Niña) 衰减年夏季的 SST 演变差异显著 (图 6 和图 7)。在 IPO 负位相, 无论是 El Niño 还是 La Niña 事件, 其衰

减年夏季东太平洋东部的 SST 异常均明显不同于 ENSO 成熟阶段; 在 IPO 正位相, ENSO 衰减年夏季东太平洋东部 SST 异常仍与成熟阶段一致。IPO 正位相下 ENSO 衰减速率弱于 IPO 负位相, ECR 相应降低。较弱的 ECR 难以有效调控 TC 生成位置, 导致在 P2 阶段, ECR 与 RI-TC 及所有 TC 生成经度之间的相关性明显减弱。

进一步分析 TCHP 与 ECR 的关系发现, ECR 对 TCHP 的影响同样受 IPO 调控。在 IPO 负位相期间, 西北太平洋菲律宾以东海域的 TCHP 从 El Niño 成熟期至衰减年夏季的演变差异, 相较于 IPO 正位相时更为显著 (图 8)。该现象与 IPO 负位相下 ENSO 演变速率更快的结论相吻合, 表明 IPO 位相可通过调控 ECR, 进而影响 TCHP 的演变过程, 这一机制最终导致 ENSO 衰



Stippling areas indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level.

图6 IPO正位相下El Niño事件(a)成熟期冬季(12-2月)、(c)衰减年春季(3-5月)、(e)衰减年夏季(6-8月)期间 SST异常(填色,单位:K)的演变;(b, d, f)与(a, c, e)相同,但为IPO负位相

Fig. 6 Evolution of SST anomalies (shading, unit: K) associated with El Niño events during (a) the mature phase (from December to February), (c) the decaying spring (from March to May), and (e) the decaying summer (from June to August) under the positive phase of the IPO; panels (b, d, f) are the same as (a, c, e), but for the negative phase of the IPO

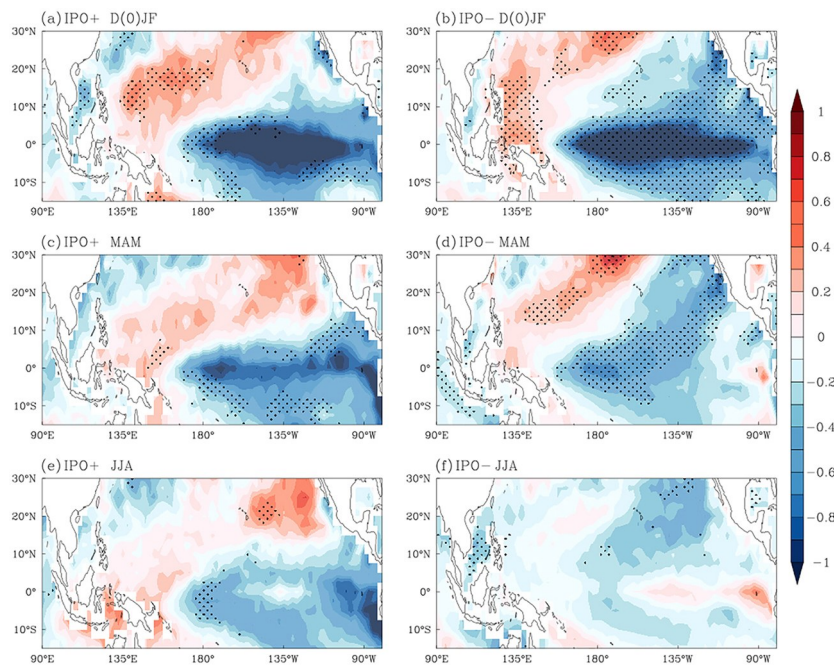
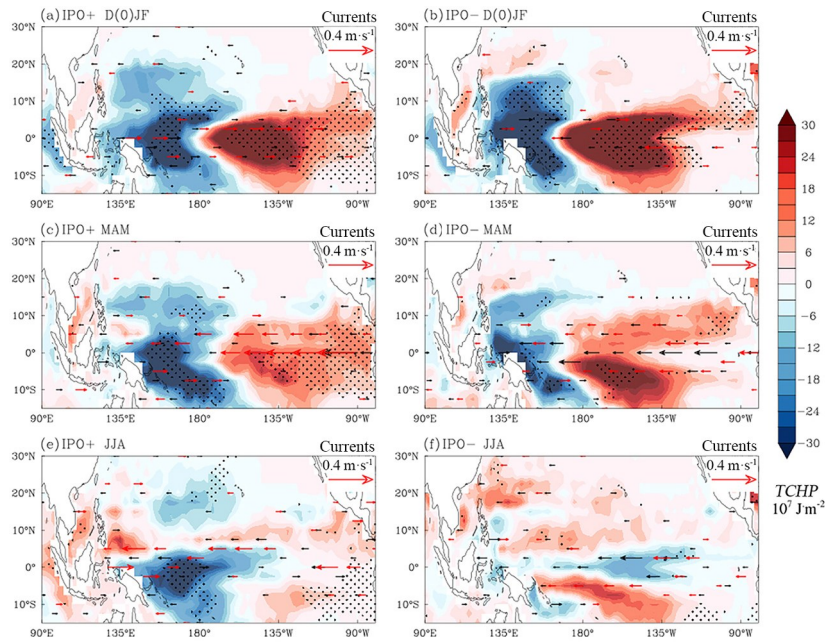


图7 同图6,但是为La Niña事件

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for La Niña events



Stippling areas and red vectors indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level.

图 8 IPO 正位相下 El Niño 事件(a)成熟期冬季(12-2月)、(c)衰减年春季(3-5月)、(e)衰减年夏季(6-8月)期间热带气旋热势能异常(填色,单位: $\times 10^7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)及海洋 100 m 以上上层垂直平均混合层纬向洋流异常(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的演变; (b, d, f)与(a, c, e)相同,但为 IPO 负位相

Fig. 8 Evolution of anomalies in tropical cyclone heat potential (shading, unit: $\times 10^7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$) and the vertically averaged zonal ocean current in the upper 100 m (vectors, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) associated with El Niño events (a) the mature phase (from December to February), (c) the decaying spring (from March to May), and (e) the decaying summer (from June to August) under the positive phase of the IPO; panels (b, d, f) are the same as (a, c, e), but for the negative phase of the IPO

减年夏季 TCHP 的空间分布在不同的 IPO 位相下呈现明显差异。在 IPO 负位相, El Niño 衰减年夏季西北太平洋西部 TCHP 显著偏高, 为 TC 生成位置西移并在该区域发生 RI 提供了充分的海洋热力支撑(图 8f)。然而, 在 IPO 正位相, 西北太平洋西部 TCHP 呈现明显的纬向非均匀分布(图 8e), RI 的发生更依赖于 TC 移动路径上的局地 TCHP 条件, 而非生成区域的大尺度环境, 使得 RI 发生位置与 TC 生成位置之间的距离显著增大(图 3c 和图 3d)。在 La Niña 衰减年, IPO 负(正)位相下, 西北太平洋西部存在显著的 TCHP 正(负)异常, 有利于(抑制) TC 西移和 RI 发生(图 9)。

在 IPO 负位相下, 东太平洋 SST 异常更快消退, 同时菲律宾海及其以西 TCHP 显著增强, 表明上层海洋热量向西再分配加速, 从而提高 ENSO 衰减效率。该过程低层信风增强并强化

Bjerknes 负反馈, 促进海洋混合层暖水向西输送与混合层热释放, 加速东太平洋暖异常衰减。而在 IPO 正位相下, 沃克环流减弱, 上层洋流热量再分配效率降低, 暖异常滞留时间延长, ENSO 衰减减缓。IPO 通过协同调控热带太平洋混合层热含量再分布、Walker 环流强度及上层海洋动力输送, 系统性影响 ECR; 进一步改变西北太平洋夏季 TCHP, VWS 和 RH 的空间分布, 进而调控 ECR 和 RI 的关系。

3 结论

Guo and Tan^[17]将 ENSO 对 RI 影响的研究从传统位相拓展至演变过程, 深化了对 ENSO-RI 关系的认知, 本研究在此基础上分析了不同 ENSO 衰减阶段对夏季 RI 发生经度的影响, 提出了一个新的变量——ECR, 以便更好地刻画 ENSO 衰减阶段的特征, 并进一步指出 ECR 对于夏季 RI 发

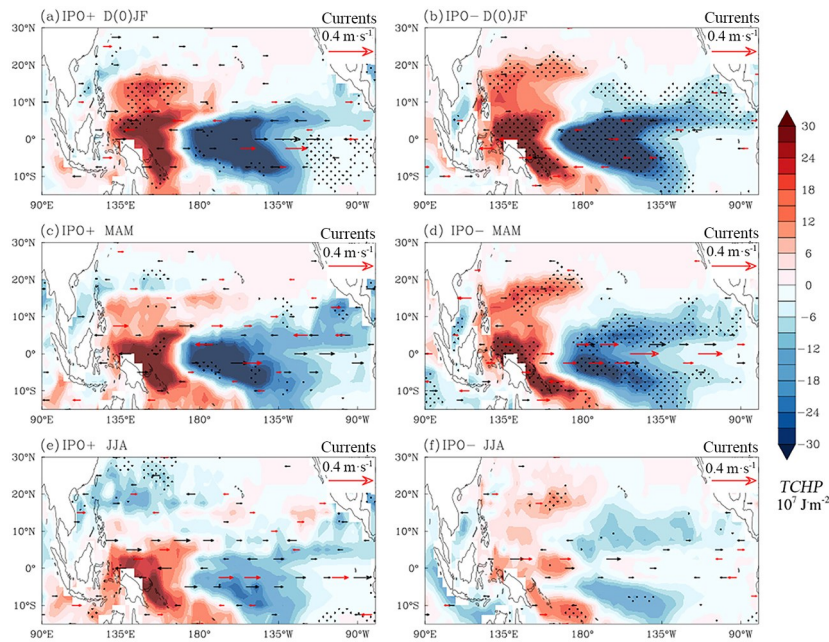


图9 同图8,但是为La Niña事件

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for La Niña events

生经度的影响受制于更长周期的气候信号IPO调控,深化了对多尺度气候变率影响TC活动机理的认识。

IPO对ECR与西北太平洋夏季RI发生位置关系存在显著的年代际调控作用。研究表明,ECR与RI发生经度在IPO负位相(P1和P3)显著正相关,而在IPO正位相(P2)负相关,这表明IPO是调控ECR-RI经度关系的重要气候信号。IPO通过调节ENSO事件的衰减速率及其遥相关效应,改变了西北太平洋的环境条件。在IPO负位相下,ENSO倾向快速衰减,协同形成西北太平洋西部“高海温、高湿度、弱垂直风切变”的有利RI发生环境,使ECR能够有效调控TC生成与RI位置同步偏移。相反,在IPO正位相下,ENSO衰减缓慢,其环流响应改变,西部环境条件抑制RI发生,RI位置更多受TC移动路径上的海洋热力条件影响,从而使ECR-RI经度关系减弱甚至转为负相关。

本研究的发现为理解与改进RI的季节预报提供了重要的机理依据。传统的季节性RI预测模型常直接使用ENSO指数作为预测因子,但本研究指出,若不考虑IPO的年代际背景,ENSO(尤其是其变化率)对RI位置的预测信号将极不

稳定。因此,在实际预测中,有必要将IPO位相作为预测因子纳入统计或动力预测模型,这为发展具有年代际适应性的RI预测方案奠定了科学基础。同时,本研究未考虑海气耦合过程的非线性反馈,未来可结合动力模式模拟深化机制研究。

参考文献

- [1] Bhatia K, Baker A, Yang W C, et al. Author correction: A potential explanation for the global increase in tropical cyclone rapid intensification. *Nature Communications*, 2023, 13(1):6626.
- [2] Zhang S J, Qian Y Z, Huang Y W, et al. Numerical simulation study on the rapid intensification of typhoon Haikui (1211) off the shore of China. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, 23(3):269—280.
- [3] Liu K S, Chan J C L. Recent increase in extreme intensity of tropical cyclones making landfall in South China. *Climate Dynamics*, 2020, 55(5):1059—1074.
- [4] Li Y, Tang Y M, Wang S, et al. Recent increases in tropical cyclone rapid intensification events in global offshore regions. *Nature Communications*, 2023, 14(1):5167.
- [5] Demaria M, Franklin J L, Onderlinde M J, et al. Operational forecasting of tropical cyclone rapid intensification at the national Hurricane center. *Atmosphere*, 2021, 12(6):683.

- [6] Rozoff C M, Kossin J P. New probabilistic forecast models for the prediction of tropical cyclone rapid intensification. *Weather and Forecasting*, 2011, 26(5): 677–689.
- [7] Alvey G R, Zipser E, Zawislak J. How does Hurricane Edouard (2014) evolve toward symmetry before rapid intensification? A high-resolution ensemble study. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2020, 77(4): 1329–1351.
- [8] Cha E J, Yang S H, Hyun Y S, et al. Recent progress on the seasonal tropical cyclone predictions over the western North Pacific from 2014 to 2020. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2022, 11(1): 26–35.
- [9] Kaplan J, Demaria M, Knaff J A. A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(1): 220–241.
- [10] An S I, Jin F F. Nonlinearity and asymmetry of ENSO. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2399–2412.
- [11] Wang B, Chan J C L. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the Western North Pacific. *Journal of Climate*, 2002, 15(13): 1643–1658.
- [12] Wang C Z, Wang X D, Weisberg R H, et al. Variability of tropical cyclone rapid intensification in the North Atlantic and its relationship with climate variations. *Climate Dynamics*, 2017, 49(11): 3627–3645.
- [13] Wang B, Zhou X. Climate variation and prediction of rapid intensification in tropical cyclones in the western North Pacific. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2008, 99(1): 1–16.
- [14] Dommenget D, Bayr T, Frauen C. Analysis of the non-linearity in the pattern and time evolution of El Niño southern oscillation. *Climate Dynamics*, 2013, 40(11): 2825–2847.
- [15] Cheng L J, Trenberth K E, Fasullo J T, et al. Evolution of ocean heat content related to ENSO. *Journal of Climate*, 2019, 32(12): 3529–3556.
- [16] 王磊, 张文君, 祁莉, 等. 两类 La Niña 季节演变过程的海气耦合特征对比. *海洋学报*, 2014, 36(1): 72–85.
- [17] Guo Y P, Tan Z M. Westward migration of tropical cyclone rapid-intensification over the Northwestern Pacific during short duration El Niño. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1507.
- [18] Guo Y P, Tan Z M. Influence of different ENSO types on tropical cyclone rapid intensification over the western North Pacific. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 2021, 126(11): e2020JD033059.
- [19] Zhou C, Wu L G, Wang C, et al. Shifted relationship between the Pacific decadal oscillation and western North Pacific tropical cyclogenesis since the 1990s. *Environmental Research Letters*, 2024, 19(1): 014071.
- [20] Zhao H K, Zhao K, Klotzbach P J, et al. Interannual and interdecadal drivers of meridional migration of western North Pacific tropical cyclone lifetime maximum intensity location. *Journal of Climate*, 2022, 35(9): 2709–2722.
- [21] Kubota H, Chan J C L. Interdecadal variability of tropical cyclone landfall in the Philippines from 1902 to 2005. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L12802.
- [22] Qin W J, Cai Y X, He L Y. The relationship between the typhoons affecting South China and the Pacific decadal oscillation. *Atmosphere*, 2024, 15(3): 285.
- [23] Wang X D, Wang C Z, Zhang L P, et al. Multidecadal variability of tropical cyclone rapid intensification in the western North Pacific. *Journal of Climate*, 2015, 28(9): 3806–3820.
- [24] Zhao H K, Wang C Z. On the relationship between ENSO and tropical cyclones in the western North Pacific during the boreal summer. *Climate Dynamics*, 2019, 52(1): 275–288.
- [25] Wang X D, Liu H L. PDO modulation of ENSO effect on tropical cyclone rapid intensification in the western North Pacific. *Climate Dynamics*, 2016, 46(1): 15–28.
- [26] Souza I P, Andreoli R V, Kayano M T, et al. Interdecadal Pacific oscillation modulation of ENSO teleconnections in its decaying stages: Relations with Indian Ocean basin-wide mode and South American precipitation. *International Journal of Climatology*, 2023, 43(7): 3264–3283.
- [27] Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93. *Journal of Climate*, 1997, 10(5): 1004–1020.
- [28] Gershunov A, Barnett T P. Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(12): 2715–2725.
- [29] Liu B W, Gan B L, Jia F, et al. Impact of the North Pacific meridional mode on the tropical Pacific

- modulated by the interdecadal pacific oscillation. *Journal of Climate*, 2024, 37(7):2199—2216.
- [30] Knapp K R, Kruk M C. Quantifying interagency differences in tropical cyclone best-track wind speed estimates. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(4): 1459—1473.
- [31] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D14):4407.
- [32] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730):1999—2049.
- [33] Carton J A, Chepurin G A, Chen L G. SODA3: A new ocean climate reanalysis. *Journal of Climate*, 2018, 31(17):6967—6983.
- [34] Kaplan J, Demaria M. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin. *Weather and Forecasting*, 2003, 18(6): 1093—1108.
- [35] Leipper D F, Volgenau D. Hurricane heat potential of Gulf-of-Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 1972, 2(3):218—224.
- [36] Emanuel K A, Nolan D S. Tropical cyclone activity and global climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(5):66—67.
- [37] Wang B, Murakami H. Dynamic genesis potential index for diagnosing present-day and future global tropical cyclone genesis. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(11):114008.
- [38] Price J F. Metrics of hurricane-ocean interaction: vertically-integrated or vertically-averaged ocean temperature? *Ocean Science*, 2009, 5(3):351—368.
- [39] Duchon C E. Lanczos filtering in one and two dimensions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1979, 18(8):1016—1022.
- [40] Song J J, Klotzbach P J, Wang Y F, et al. Influence of different La Niña decay types on tropical cyclone genesis over the western North Pacific. *Atmospheric Research*, 2022, 280:106419.
- [41] Tu S F, Xu J J, Xu F, et al. Differences in the destructiveness of tropical cyclones over the western North Pacific between slow- and rapid-transforming El Niño years. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(2):024014.

(责任编辑 杨贞)