

杨昕玮, 邵宇行, 赵海坤, 等. 环境引导气流两类型年际模态与西北太平洋热带气旋活动的联系[J]. 海洋学报, 2023, 45(3): 1–13, doi:10.12284/hyxb2023036

Yang Xinwei, Shao Yuhang, Zhao Haikun, et al. Two leading modes of environmental steering flow in the interannual time scale and their associations with tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(3): 1–13, doi:10.12284/hyxb2023036

环境引导气流两类型典型年际模态与西北太平洋热带气旋活动的联系

杨昕玮¹, 邵宇行¹, 赵海坤^{1*}, 韩翔², 周育锋³, 姜明波³

(1. 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/太平洋台风研究中心, 江苏南京 210044; 2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316000; 3. 北京应用气象研究所, 北京 100082)

摘要: 本文基于中国气象局上海台风研究所整编的热带气旋 (Tropical Cyclone, TC) 最佳路径资料及美国 NCEP/NCAR 月平均再分析资料, 采用经验正交函数分解、合成分析、相关分析等统计方法, 分析了 1979–2016 年 7–9 月西北太平洋地区海盆尺度大尺度环境引导气流的年际变化与热带气旋活动之间的联系。结果表明: (1) 西北太平洋地区夏季大尺度环境引导气流在年际尺度上存在两个典型模态。其中第一典型模态大尺度环境引导气流呈现经向分布的偶极型环流型, 该模态与东部型 EN-SO 密切相关; 第二典型模态大尺度环境引导气流呈明显的局地反气旋环流形态, 其与中部型 EN-SO 和热带大西洋海温异常紧密关联。(2) 大尺度环境引导气流第一典型模态异常年份之间 TC 活动 (生成位置、路径、强度和持续时间) 具有显著差异, TC 生成空间分布南北差异显著; TC 路径尤其西北行和西行盛行路径也具有显著差异。(3) 第二典型模态异常年份之间, TC 生成位置和路径差异与第一模态呈现显著不同, TC 生成位置呈现较为明显的东西向分布, 在东南象限 TC 生成差异尤为显著, TC 路径的差异主要体现在西北行和近海转向两类盛行路径。

关键词: 大尺度引导气流; 西北太平洋; 热带气旋移动; 海温异常; 年际尺度

中图分类号: P444; P721

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)03-0001-13

1 引言

热带气旋 (Tropical Cyclone, TC) 是地球上最严重的自然灾害之一, 它所伴随的风场和降水给 TC 活动区域内居民带来了严重的生命和财产威胁。TC 路径的精准预报是 TC 预报中最重要的一环, 在减少 TC 造成的灾害中起关键作用。西北太平洋 (Western North Pacific, WNP) 地区是 TC 活动最为频繁的区域, 也是唯一一个全年均有 TC 活动的地方^[1]。提高西北太平洋 TC 路径的预报水平, 对于减少 TC 造成的生

命财产损失有着重要意义。

TC 路径主要由生成位置及随后的运动决定, 从气候角度出发, TC 运动主要由大尺度环境引导气流和 Beta 漂移两部分组成, 其中大尺度环境引导气流被认为是影响 TC 路径变化更为重要的因子^[2-4]。Wu 和 Wang^[5] 研究认为, 虽然大尺度环流系统能够为 TC 的生成提供有利的环境条件, 如低层辐合、气旋性相对涡度以及适宜的垂直风切^[6-7], 但是对 TC 路径变化的影响更为重要。Wu 等^[8] 发现, 在 1965–2003 年间, 全球气候变化导致 TC 平均移动速度和大尺度

收稿日期: 2021-10-10; 修订日期: 2022-10-08。

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年项目 (41922033); 江苏省大学生创新创业训练计划 (201910300096Y)。

作者简介: 杨昕玮 (1999—), 男, 浙江省宁波市人, 主要从事热带气旋研究。E-mail: xwyang_123@163.com

* 通信作者: 赵海坤, 男, 教授, 研究方向为台风气候动力学与台风预测技术研制。E-mail: haikunzhao@nuist.edu.cn

引导气流发生变化,使东亚地区更容易受台风活动影响,并且 TC 路径北偏,南海地区 TC 活动减少。Liu 和 Chan^[8]发现 1960–2005 年间 WNP TC 路径存在显著的年代际变化,并把这种变化归因于大尺度引导气流的变化。赵海坤^[9]采用了自行完善的 TC 活动模式系统,从年际和年代际尺度分别定量考察了大尺度引导气流对 WNP TC 盛行路径的贡献。结果表明,年际尺度上,大尺度环境引导气流对近海转向型 TC 的影响更加显著^[10],而在年代际尺度大尺度环境引导气流对 3 类盛行路径的影响呈现主导地位,结果表明年际时间大尺度环境引导气流的影响呈现主导地位^[11]。从天气尺度扰动的角度,Zhou 等^[12]发现了不同的扰动型下不同的 TC 路径特征主要是由大尺度引导气流和生成位置的变化造成的。苏源和吴立广^[13]也从天气尺度和低频变化角度表明了大尺度引导气流在多时间尺度上的变化对台风“海棠”路径异常变化的重要影响。

在年代际时间尺度上,Clark 和 Chu^[14]研究表明,太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)从 20 世纪后期由冷位相向暖位相转变,使得更强更频繁的 ENSO 事件发生,导致太平洋中部 TC 生成频数增加。何鹏程和江静^[15]分别从 PDO 冷暖位相研究了 WNP TC 生成频数与海温分布差异的联系以及 500 hPa 高度场对 TC 频数和生成源地的影响,结果表明 PDO 对 WNP TC 活动与大尺度环流年际相关的年代际变化有重要影响。Li 等^[16]研究表明,由于引导气流的变化,在 IPO(Inter-decadal Pacific Oscillation)不同位相上 TC 路径在稳定的西移过程中伴有较小的变化。最近也有结果显示,WNP TC 活动的年代际变化与青藏高原积雪的变化紧密关联^[17]。在年际时间尺度上,大量研究表明 ENSO 事件通过海温异常引起沃克环流变化从而改变大尺度引导气流的配置,进而改变西北太平洋 TC 的生成位置、路径和强度特征^[18–24]。在 El Niño 年,TC 生成个数在西北太平洋东南象限显著增多,TC 生命周期也相对变长,La Niña 年状况则相反^[25–26]。在这过程中,西北太平洋异常反气旋起关键作用,赤道中东太平洋海表温度暖异常激发出罗斯贝波,其在西北太平洋形成的西北太平洋异常反气旋(Western North Pacific Anomalous Anticyclone, WN-PAC)在印度洋和大西洋海温暖异常的相互作用下能够持续至翌年夏季^[27–28]。WN-PAC 的产生导致下沉运动,低层涡度减小,抑制西北太平洋 TC 生成^[29],且 WN-PAC 南侧东风异常,无充足的水汽输送,使得西北太平洋 TC 生成个数减少^[30]。此外,在 El Niño 年的

10 月,台风向北移动更为频繁^[25]。也有研究利用聚类分析发现,El Niño 和 La Niña 分别会对不同类别的路径个数产生影响,并进而影响台风的登陆情况^[31–32]。

综上,目前大多数研究都是基于 TC 路径气候异常变化的观测事实,定性分析对应的大尺度环境引导气流变化来理解其路径的变化,而很少直接从大尺度环境气流变化的角度来理解 TC 路径及其相伴随的 TC 活动的变化特征,在年际尺度上对于海温通过引导气流和大尺度环境场对于 TC 包括路径、生成位置以及强度在内活动变化特征的影响讨论相对较少。本文将着眼于 TC 活动异常活跃的 WNP 地区,在年际时间尺度讨论大尺度环境引导气流的典型模态及其对 TC 路径的影响及其相伴随的包括 TC 生成位置、强度以及路径长度在内的其他特征变化之间的联系,进一步深化大尺度环境引导气流对 TC 活动的整体认识,为台风活动的季节–年际预测提供理论参考。

2 资料和方法

TC 资料取自中国气象局上海台风研究所(Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, CMA-STI)整编的 1979–2016 年 7–9 月“CMA 热带气旋最佳路径数据集”,数据集包含 TC 中心每 6 h 一次的位置和强度信息,分析时只保留热带风暴级别及以上(近中心风速 ≥ 17.2 m/s)且生命周期达到 24 h 及以上的 TC 资料^[33]。环境场数据来自美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)月平均再分析资料,包括逐月垂直速度、比湿、纬向风、经向风、海表面温度及位势高度等,选取时间段为 1979–2016 年 7–9 月,空间网格分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ^[34]。海温数据来自哈德来中心海表温度月平均资料(HadISST1),水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ^[35]。

前人研究提出了多种环境引导气流的计算方法,但是目前仍然没有一个统一的“最佳引导气流”的定义。董克勤和刘治军^[36]对地面到 200 hPa 各等压面基本气流进行分析后得出,利用上下两层进行引导气流计算相对采用单层等压面效果更为显著。有研究对比了多个高度的引导气流发现,500~700 hPa 距台风中心 $5^\circ \sim 7^\circ$ 范围内的环境引导气流与台风移动方向最为贴近^[37–38]。也有研究指出引导气流的选取与 TC 强度有关,对于强度较大的 TC,可以采用偏高层引导气流。目前大量研究表明,将垂直平均风场作为平均引导气流对于解释 TC 的运动有着很好的效果^[3, 11, 39]。

因此, 本文将采用 300~850 hPa 整层风场的算术平均作为环境引导气流, 对其进行正交经验分解(Empirical Orthogonal Function, EOF), 并基于 North 特征值显著性检验挑选典型模态^[40], 来获取大尺度环境引导气流典型年际模态。

为研究 WNP TC 盛行路径变化与大尺度环境引导气流主要模态之间的联系, 采用常用的 K-means 聚类算法对 WNP TC 路径进行了分类^[31, 41]。权重指标为 2 min 平均近中心风速的平方根, 选取的参数为质心的经度位置、质心的纬度位置、经向方差、纬向方差以及对角线方向上的方差。K-means 聚类过程中采用平方欧几里得距离并使用 K-means++ 算法进行质心初始化。

3 两类大尺度环境引导气流典型年际模态

经 EOF 得到的大尺度环境引导气流第一主要年际模态(EOF1)、第二主要年际模态(EOF2)及其对应的标准化时间系数如图 1 所示。第一主要年际模态方差贡献率为 34.85%, 第二主要年际模态方差贡献率为 17.18%, 前两个主要年际模态累计方差贡献率为 52.03%, 表明这两类年际模态能够反应西北太平洋大尺度环境引导气流的主要年际特征。前两类主要年际模态呈现出不同的环流特征, EOF1 为经向分布的

偶极型环流型, 以 20°N 为分界线, 以南区域(0°~20°N, 125°~170°E)为反气旋性环流异常, 以北区域(20°~40°N, 130°E~180°)为气旋式环流异常, 赤道附近为东风异常。EOF2 在日本以南区域(10°~40°N, 100°~145°E)为反气旋式环流, 赤道附近为东风异常。

在年际时间尺度上, EOF1 时间系数具有显著上升趋势, 气候倾向率为 0.78 a⁻¹(达到 97.3% 置信水平), 20 世纪 80 年代末期到 90 年代中期以负位相为主, 20 世纪 90 年代中期以后以正位相为主, 存在约以 11 a 为周期的年代际变化。EOF2 的时间系数没有表现出明显的变化趋势。

为了更好地研究大尺度环境引导气流两类典型模态异常年份所对应大尺度环流变化、海温分布特征以及 TC 活动特征, 将第一、第二主要年际模态时间系数位于前(后)25% 的年份取为正(负)异常年份(表 1)。

TC 引导气流年际变化与热带大尺度海气相互作用密切相关。对两个模态时间系数与同期(7~9 月)海温进行相关性分析(图 2, 图 3)发现, 第一主要年际模态时间系数与赤道西太平洋和赤道大西洋海表温度的相关系数分别为 0.63、0.52(均通过 99% 显著性检验), 具有显著的正相关性, 与赤道中东太平洋和赤道东太平洋海表温度的相关系数分别为 -0.58、-0.45(均通过 99% 显著性检验), 具有显著的负相关性。

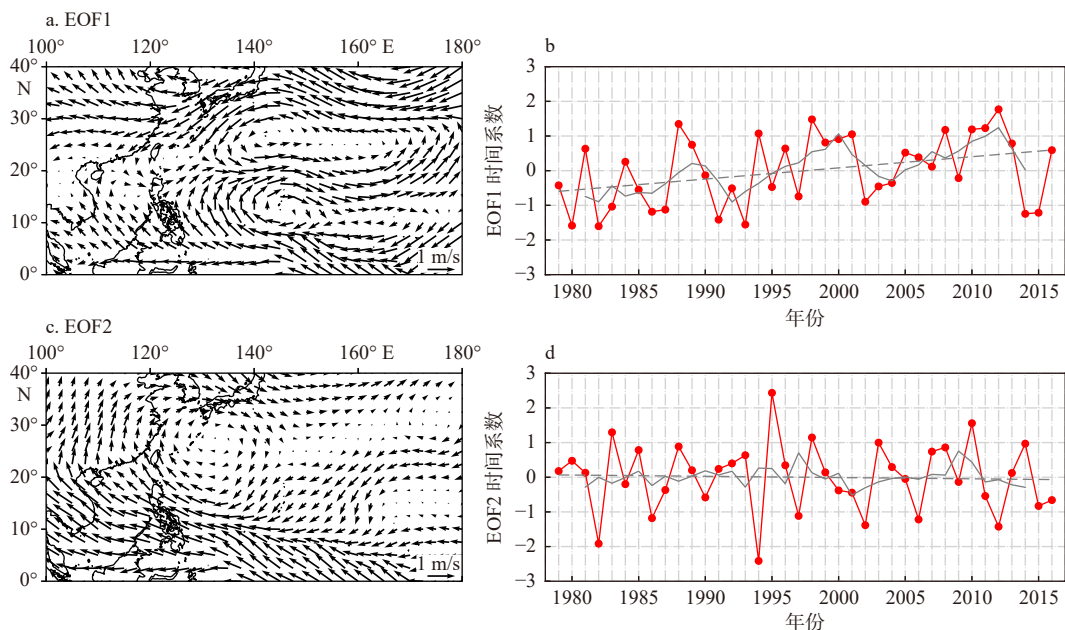


图 1 引导气流 EOF 第一、第二主要年际空间模态(a, c)及标准化时间系数(b, d)

Fig. 1 Steering flow (a, c) and the standardized time coefficient (b, d) of EOF1 and EOF2

灰色实线为 5 点平滑处理结果, 灰色虚线为线性倾向

5-point smoothing is denoted by the solid gray line; the linear tendency is denoted by the dashed gray line

表 1 EOF 第一、第二主要年际模态正负异常年份

Table 1 Positive and negative anomaly years of EOF1 and EOF2

EOF第一主要年际模态									
正异常年	1988	1994	1998	2000	2001	2008	2010	2011	2012
负异常年	1980	1982	1983	1986	1987	1991	1993	2014	2015
EOF第二主要年际模态									
正异常年	1983	1985	1988	1995	1998	2003	2008	2010	2014
负异常年	1982	1986	1994	1997	2002	2006	2012	2015	2016

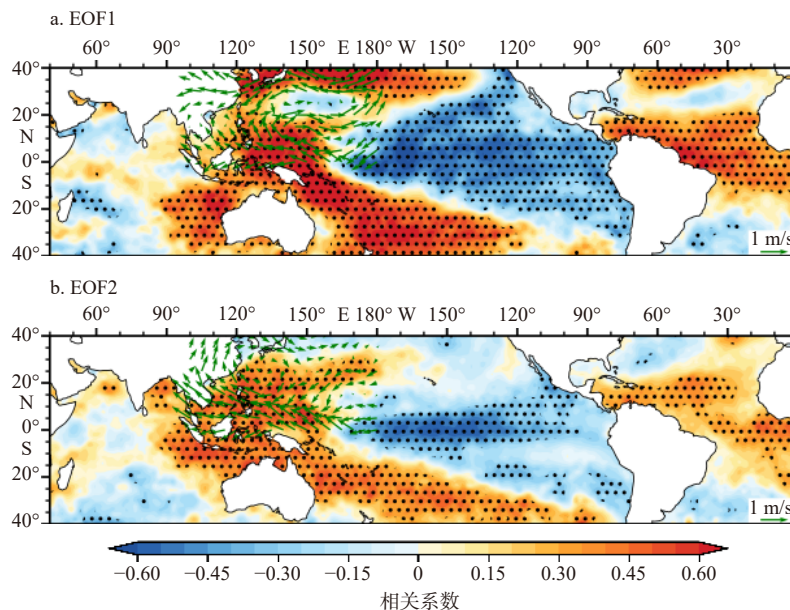


图 2 EOF 第一、第二主要年际模态时间系数与海表温度相关系数的空间分布和引导气流 EOF 第一、第二主要年际模态(绿色矢量箭头)

Fig. 2 Spatial distribution of correlation coefficient between time coefficient and sea surface temperature of EOF1 and EOF2 and steering flow of EOF1 and EOF2 (green vectors)

打点为通过 90% 显著性检验

Dots denote areas that are significant at the 95% confidence level

第二主要年际模态时间系数与海温的显著正相关区域位于赤道西太平洋和赤道大西洋, 相关系数分别为 0.37、0.36(均通过 95% 显著性检验), 显著负相关区域位于赤道中东太平洋, 相关系数为 -0.46(通过 99% 显著性检验)。两模态时间系数与海表温度的显著相关区域分布特征与 La Niña 分布特征较为类似, 但海表温度冷异常区域不同, 第一主要年际模态对应的海表温度分布与 WNP 地区的海气耦合模态和东部型 ENSO 密切相关, 第二主要年际模态对应的海表温度分布与中部型 ENSO 紧密关联, 两类 ENSO 类型会造成大尺度环境场的变化从而影响 WNP TC 特征变化^[42]。

考虑到海表温度异常对 WNP 大尺度环流具有一定的滞后影响, 对两模态下正负异常年份前一年秋季

(SON)、冬季(DJF)、同年春季(MAM)、夏季(JJA)海温进行了差值分析(图 4), 第一主要年际模态赤道海表温度异常分布从前一年秋季至同一年夏季表现为赤道西太平洋暖异常、赤道中东太平洋冷异常, 在该时段内赤道中东太平洋冷异常不断加强, 与 La Niña 发展年特征基本一致。对于第二主要年际模态, 前一年秋季至冬季期间赤道中东太平洋存在显著的暖异常且不断加强, 同一年春季至夏季期间该暖异常逐渐减弱, 转化为赤道中太平洋冷异常, 与 El Niño 衰减并过渡到 La Niña 的过程相类似。

第一主要年际模态下 20°N 以南的反气旋式环流主要是由中东太平洋冷海温异常通过 Gill 响应形成的, 20°N 以北的气旋环流可能与南侧反气旋式环流

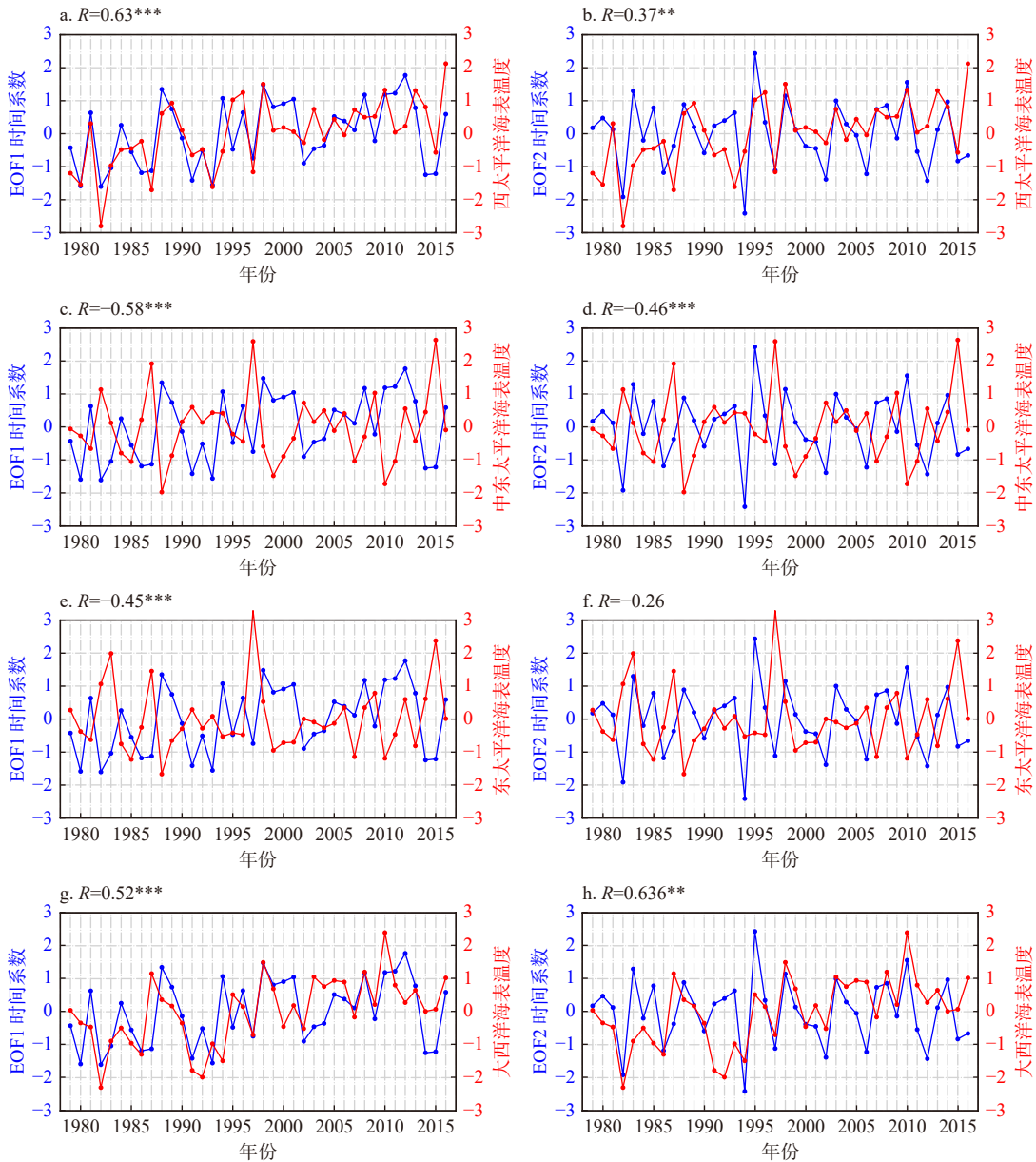


图3 EOF第一、第二主要年际模态时间系数与赤道西太平洋(5°S~5°N, 130°~160°E)(a, b)、赤道中东太平洋(10°S~10°N, 100°W~180°)(c, d)、赤道东太平洋(10°S~10°N, 80°~120°W)(e, f)、赤道大西洋(10°S~20°N, 70°W~0°)(g, h)7-9月海表温度进行相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between time coefficient of EOF1 and EOF2 and sea surface temperature in the equatorial western Pacific (5°S~5°N, 130°~160°E) (a, b), the equatorial central and eastern Pacific (10°S~10°N, 100°W~180°) (c, d), the equatorial eastern Pacific (10°S~10°N, 80°~120°W) (e, f) and the equatorial Atlantic (10°S~20°N, 70°W~0°) (g, h)

显著性: *代表>90%、**代表>95%、***代表>99%;海表温度为标准化温度

Significance: * represents >90%, ** represents >95%, *** represents >99%; the sea surface temperature is the standardized temperature

造成的 Hadley 上升支减弱以及北侧下沉支减弱有一定的关系。对于第二主要年际模态, 在 El Niño 发展年, 中东太平洋暖异常以及赤道北大西洋冷异常对 WNPAC 的重新加强起着一定的作用, 一方面中东太平洋暖异常激发出的罗斯贝波有利于 WNPAC 的产生, 另一方面, 赤道北大西洋冷异常所产生的开尔文波及有关的埃克曼辐散过程对于 WNPAC 的产生和

加强起到重要的贡献作用。WNPAC 的存在使得第二主要年际模态下西太平洋副热带高压(Western Pacific Subtropical High, WPSH)面积偏大、强度偏强, 此外, 赤道太平洋海表温度东冷西暖的分布使得沃克环流上升支西移, 被抑制的上升气流所激发出的罗斯贝波有利于副热带高压增强^[43]在赤道西太平洋附近造成东风异常, 对 WPSH 也起着一定的加强作用, 较强

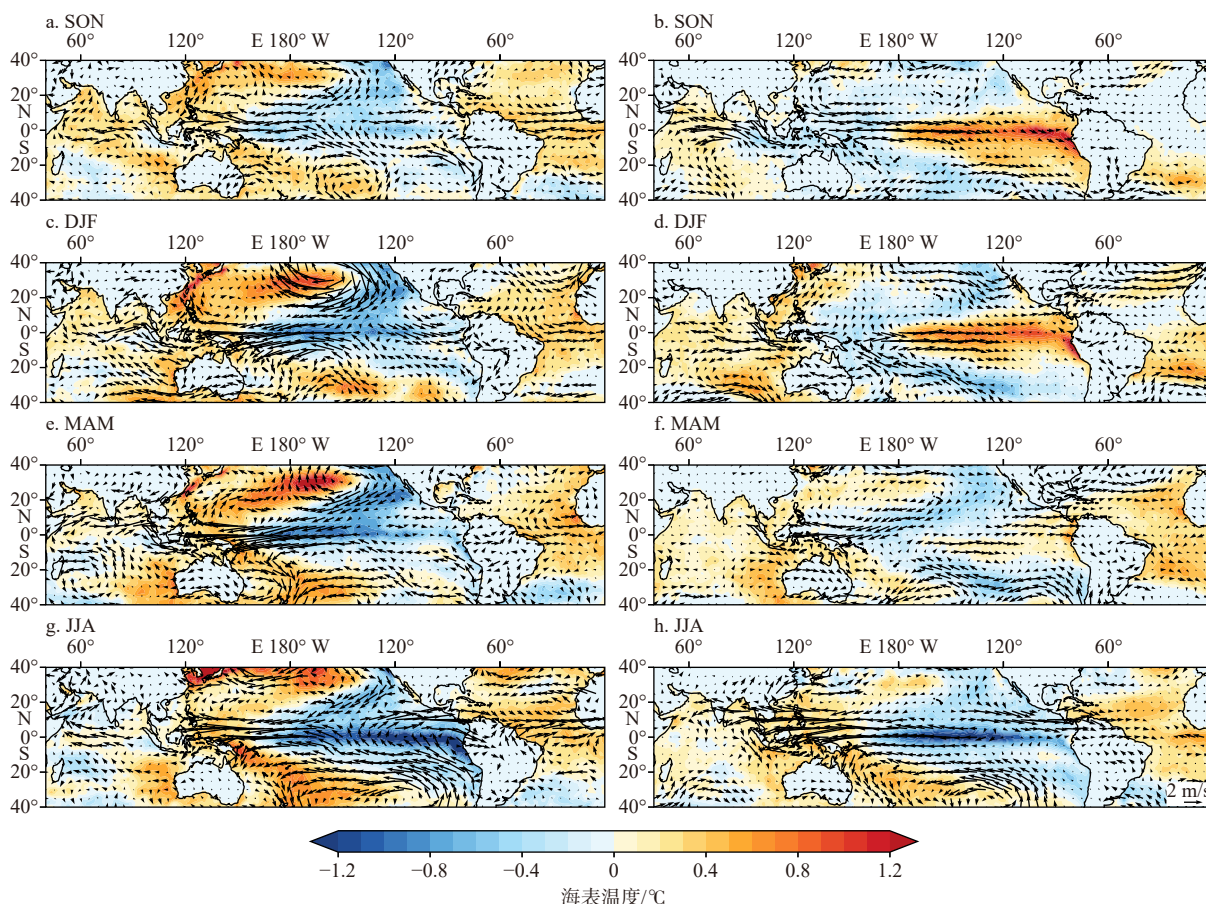


图4 EOF第一(左侧)、第二(右侧)主要年际模态下正负异常年前一年秋季(SON)、冬季(DJF), 同年春季(MAM)、夏季(JJA)海表温度及850 hPa风矢量场(黑色矢量箭头, 单位: m/s)合成差异

Fig. 4 Sea surface temperature and 850 hPa winds (black vectors, unit: m/s) composite differences between positive and negative years of EOF1 (left) and EOF2 (right) from the previous fall (SON) and winter (DJF), concurrent spring (MAM) and summer (JJA)

的 WPSH 使得第二主要年际模态呈现出明显的反气旋式环流。

4 两类典型大尺度环境引导气流年际模态与 TC 路径和强度的联系

基于 TC 盛行路径分析方法^[9], 对 1979–2016 年 7–9 月 TC 路径和生成位置在 $2^\circ \times 2^\circ$ 空间网格点的出现频次进行计算获得两模态下正负异常年 TC 路径密度差异(图 5a, 图 5b)和生成位置密度差异(图 5c, 图 5d), 其中生成位置为 TC 近地面最大风速第一次达到或超过 17.2 m/s 时刻时的位置。对两模态下正负异常年 TC 路径(图 6)和 TC 路径密度差异(图 5a, 图 5b)进行分析, TC 合成路径为将各路径生命周期等分成 21 个时间点后各时间点的位置平均(图 7 集群中心以相同方式获得), 分析发现, 两模态正负异常年 TC 路径均表现为: 向西北方向移动后在 25°N 附近向东北方向转向, 正异常年份相较于负异常年份 TC 移动路径偏短, 强度偏弱。在 TC 路径密度差异方

面, 第一主要年际模态呈现明显的南北差异, 在正异常年份下, 台风路径南少北多, 第二主要年际模态呈现海盆一致变化, 除南海海域外, 正异常年台风路径密度整体小于负异常年。

第一主要年际模态正、负异常年份 TC 活动频繁区域呈现以 22°N 为分界的分布特征(图 5a), 在负异常年份, TC 在菲律宾以东 ($10^\circ \sim 22^\circ\text{N}$, $120^\circ \sim 160^\circ\text{E}$) 有一呈东西向分布的活动频繁区域, 正异常年份 TC 在日本以南区域 ($25^\circ \sim 35^\circ\text{N}$, $115^\circ \sim 165^\circ\text{E}$) 活动频繁, 且大值区位于我国以东海域 ($24^\circ \sim 30^\circ\text{N}$, $120^\circ \sim 130^\circ\text{E}$)。

第二主要年际模态下 WNP 大部分区域表现为 TC 在负异常年份活动频繁, 且有 3 个大值中心, 分别位于台湾以东 (22°N , 125°E)、日本以南 (25°N , 135°E) 和西北太平洋东南侧海域 (18°N , 155°E), 在南海北侧海域则表现为 TC 在正异常年活动频繁。

类似地, Zhao 等^[20] 利用聚类分析得到了 3 类热带气旋移动路径, 并考察了两类 ENSO 下路径分布的年

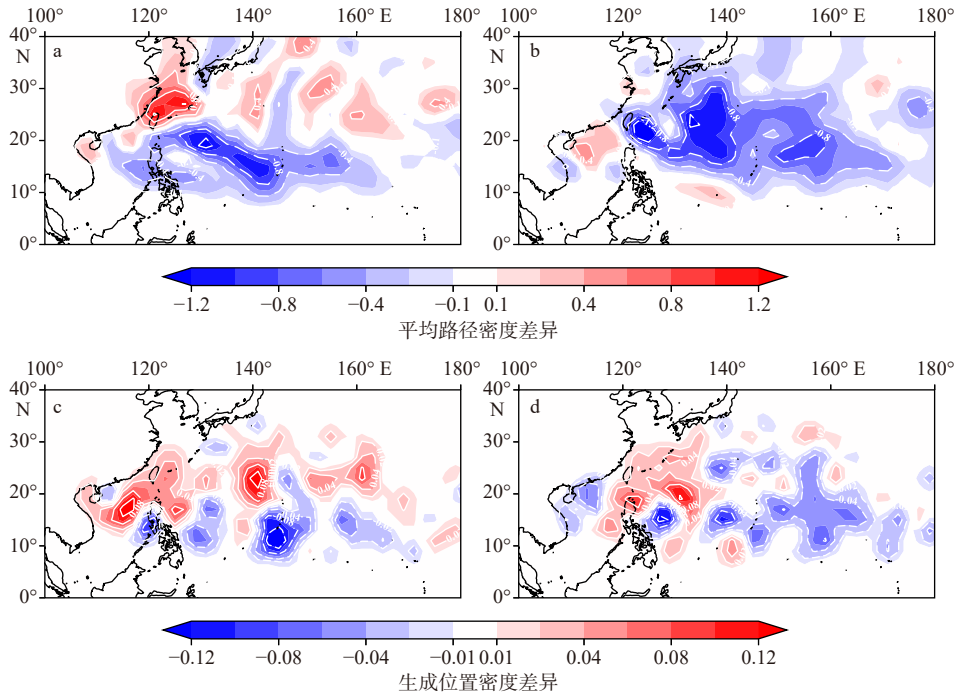


图5 EOF第一、第二主要年际模态正负异常年份热带气旋平均路径密度差异(a, b)及生成位置密度差异(c, d)
 Fig. 5 Mean TC track density difference (a, b) and TC genesis density location difference (c, d) between the positive and negative years of EOF1 and EOF2

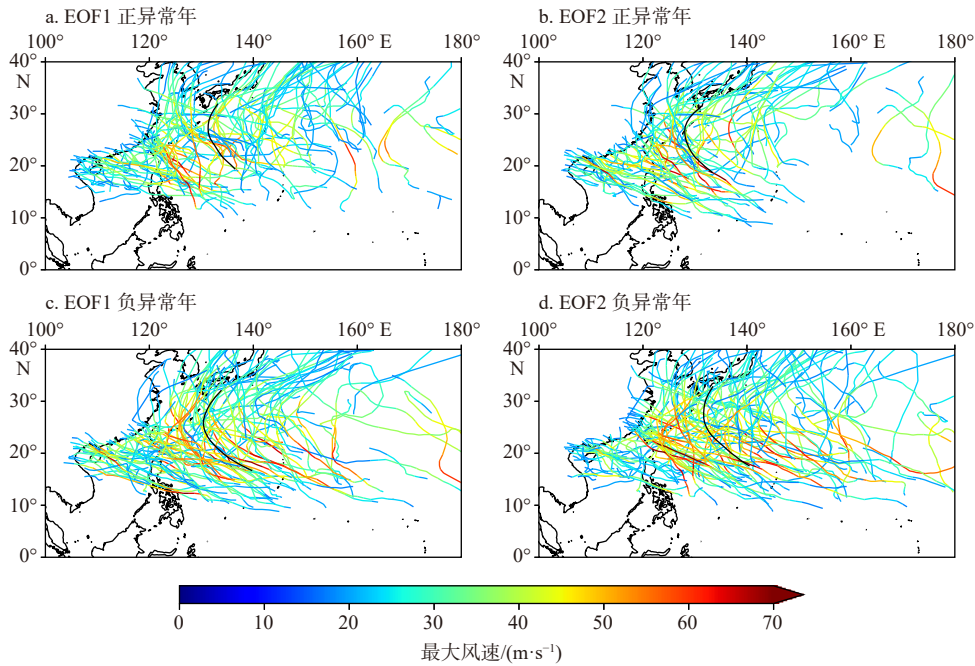


图6 EOF第一、第二主要年际模态正负异常年TC路径
 Fig. 6 TC tracks during the positive and negative phases of EOF1 and EOF2

黑色线为TC合成路径, 不同颜色的线代表10 m最大风速
 Black lines represent the prevailing TC tracks; lines with different colors represent the maximum 10 m wind speed

代际变化, 发现与类 ENSO 有关的 EOF 第一主要年际模态, WNP 台风活动呈一致性, 并与南海北侧 TC 活动呈相反关系。本文第二主要年际模态对应的路径密度分布与其依据路径 EOF 得到的第一主要年

际模态路径密度相一致, 但是在利用聚类方法得到的西行路径并没有显示出类 La Niña 年减少的特征, 这主要可能是从大尺度引导气流的变化不仅仅来自于 ENSO 变化, 为此可直接从大尺度引导气流变化角度

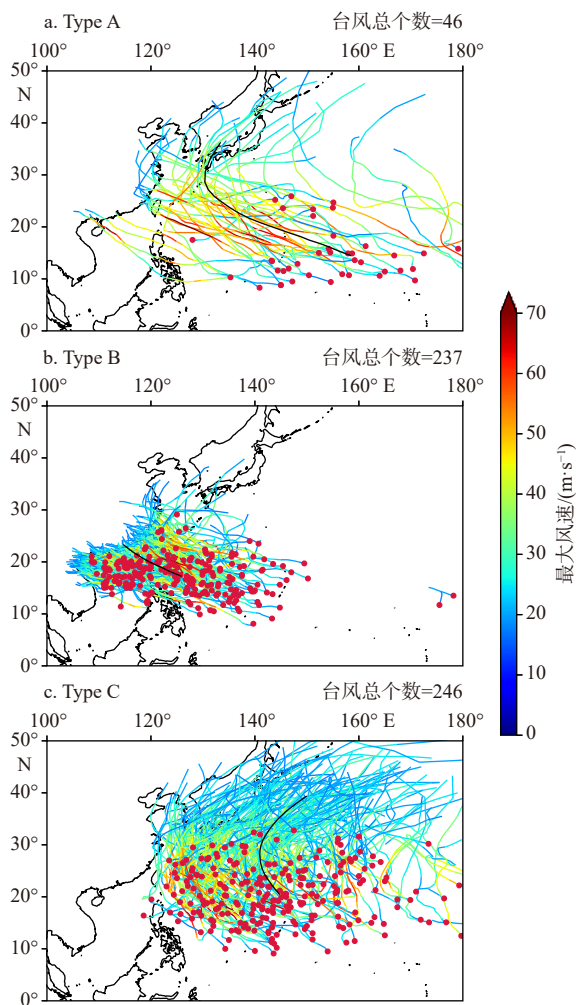


图7 3类TC(Type A、Type B、Type C)路径的10 m最大风速、生成位置(红色圆点)和每类集群中心(黑色实线)

Fig. 7 Maximum 10 m wind speed, genesis location (red dots) and cluster center of each type (black lines) of three types of TC track (Type A, Type B, Type C)

展开分析,认识除 ENSO 以外的其他主要海洋模态对台风活动年际变化的影响。

为进一步比较大尺度环境引导气流的两个主要模态下 TC 路径特征,采用 K-means 聚类方法将 TC 路径分成 3 类(图 8)。Type A 为西北行路径,生成位置主要位于 140°E 以东的洋面,平均生成中心为 14.5°N, 158.4°E,生成位置距离我国最远,该类 TC 生成后向西北方向直行,多数 TC 移动至我国东部海域附近后向东北方向转折,生命周期在 3 类路径中最长。Type B 为西行型,主要生成于南海及菲律宾附近海域(10°~25°N, 110°~150°E),平均生成中心为 17.3°N, 125.8°E,生成位置距离我国最近,移动路径最短,多数 TC 向西北方向移动至我国沿海,登陆后迅速消亡,相较于 Type A,其活动区域纬度偏低。Type

C 为近海转向路径,其生成位置主要分布在菲律宾以东区域(10°~30°N, 120°~170°E),平均生成位置为 20.5°N, 144.7°E,在 3 类路径中纬度最高,多数 TC 向西方向移动至 30°N 附近后偏转向东北方向。

表 2 为两模态下正负异常年份各类年 TC 频数的差异,第一主要年际模态下,正异常年份西北型路径 TC 频数相对于负异常年份显著偏少(通过 95% 显著性检验),对比引导气流可以发现,该类路径频数偏少与该模态所对应的 WNP 中部区域西北气流的抑制作用有关,而西行路径 TC 频数相对于负异常年份显著偏多(通过 90% 显著性检验),这主要与该模态下南海至台湾东侧 TC 生成频数较多有关。正异常年份近海转向路径 TC 偏多,但未通过显著性检验。

对于第二主要年际模态,正异常年份西北行路径 TC 频数相对于负异常年份显著偏少(通过 95% 显著性检验),该类路径频数偏少与该模态下 WNP 东南侧 TC 生成频数偏少有关。西行路径 TC 频数正负异常年份没有差异,正异常年份近海转向的 TC 频数相对于负异常年份偏少,未通过显著性检验,该类路径 TC 频数偏少与该模态所对应的 WPSH 东侧偏北气流影响有关。

对两模态正负异常年份 TC 平均生成个数、生命周期、生成位置经纬度以及用于表示强度的破坏潜力指数(Power Dissipation Index, PDI)^[44]、路径最大风速、路径平均风速差异进行分析(表 3)发现,对于第一主要年际模态,正异常年份相较于负异常年份,TC 生命周期、初始纬度、PDI、最大风速、平均风速具有显著的差异(均通过 95% 显著性检验)。正异常年份相较于负异常年份 TC 平均生命周期短 38.39 h,初始时刻位置纬度高 2.99°,PDI 低 $6.06 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}^3$,最大风速和平均风速低 6.64 m/s 和 3.30 m/s。此外,正异常年份 TC 生成个数偏多、初始时刻位置偏西,但未通过显著性检验。

对于第二主要年际模态,正异常年份相较于负异常年份,TC 生成个数、生命周期、初始经度、PDI、最大风速具有显著的差异(均通过 90% 显著性检验)。正异常年份平均相较于负异常年份 TC 生成个数少 3.11 个,生命周期短 44.08 h,初始位置偏西 7.80°,PDI 低 $9.51 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}^3$,最大风速低 3.34 m/s。

比较两个主要模态发现,在个数方面,第一主要年际模态正异常年相对于负异常年 TC 频数偏多而第二主要年际模态正异常年 TC 频数偏少。在生成位置方面,第一主要年际模态正负异常年 TC 生成位置在南北方向上具有显著差异,而第二模态正负异常

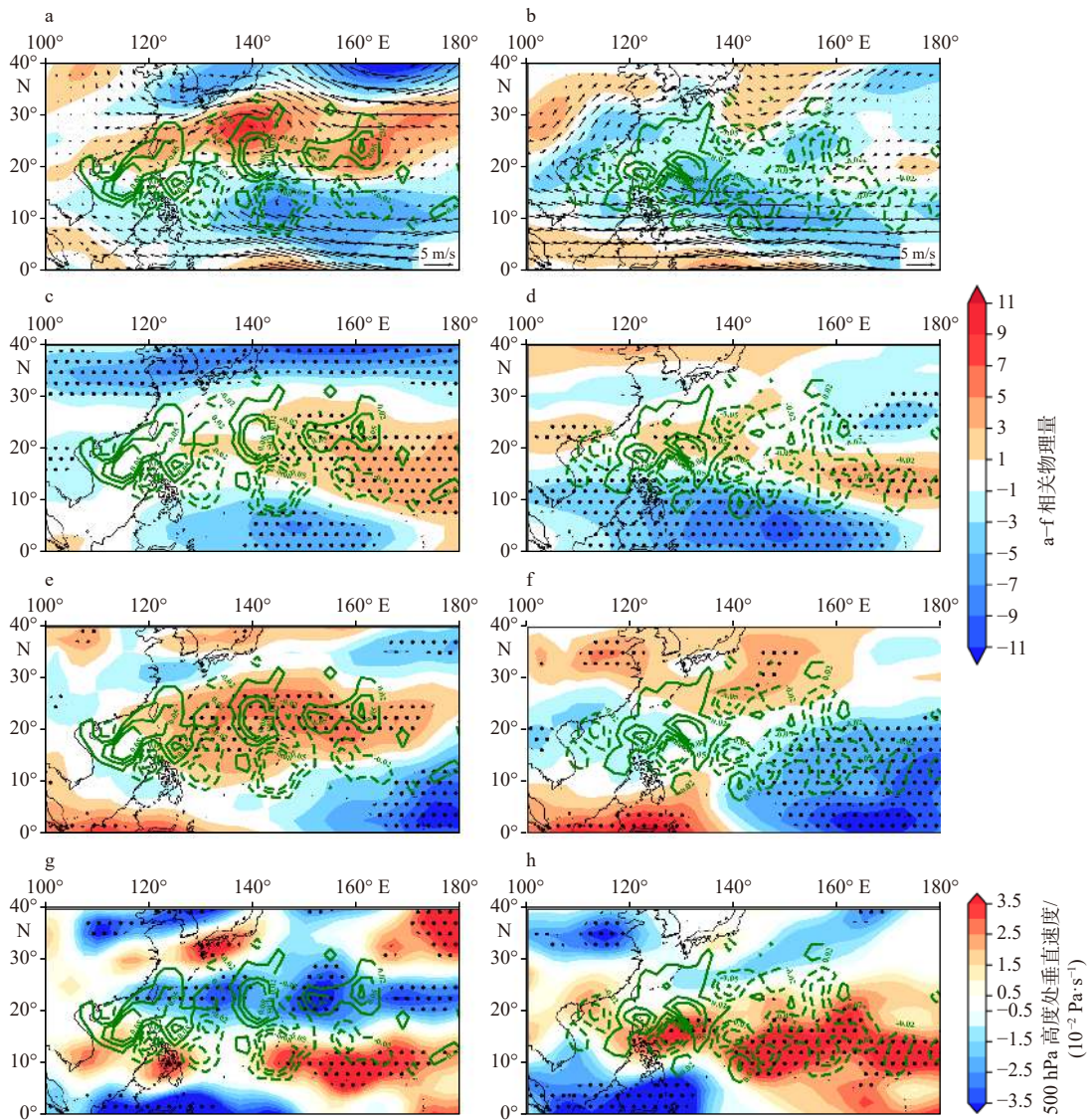


图8 EOF第一、第二主要年际模态正负异常年涡度场(单位: $10^{-6} s^{-1}$)叠加850 hPa风矢量场(单位: m/s)(a, b)、200~850 hPa垂直风切变(c, d, 单位: m/s)、700 hPa相对湿度(e, f)、500 hPa高度处垂直速度(g, h, 单位: $10^{-2} Pa/s$)差异
 Fig. 8 Difference of vorticity fields (unit: $10^{-6} s^{-1}$) superposition 850 hPa wind vector field (unit: m/s) (a, b), vertical wind shear (unit: m/s) between 200~850 hPa (c, d), relative humidity of 700 hPa (e, f), and vertical velocity of 500 hPa height (g, h, unit: $10^{-2} Pa/s$) between positive and negative years of EOF1 and EOF2

绿色等值线为平均路径密度; 打点为通过95%显著性检验

Green counters are the density of TC tracks; dots are the value that is significant at a 95% confidence level

表2 两个模态正负异常年各类年TC频数差值

Table 2 Annual TC frequency difference between positive and negative years of EOF1 and EOF2

模态	Type A	Type B	Type C
EOF1	-1.33**	1.78*	0.78
EOF2	-1.78**	0	-1.33

注: *代表显著性大于90%, **代表显著性大于95%。

年TC生成位置差异主要体现在东西方向上。另外第二主要年际模态正负异常年生命周期和PDI差异

相较于第一主要年际模态更为显著。在强度方面, 两模态下正异常年份相较于负异常年份TC强度显著偏弱, 这是由于两模态TC生成位置更接近大陆, 生命周期减少, 在海上移动距离偏短, 从海表面吸收能量增强的时间减短^[45]。不同于前人研究得到的西北太平洋夏季台风生成个数在ENSO发展或衰减年差异不显著的结论^[25, 30], 本文第二主要年际模态TC生成个数显示出了显著差异, 这可能是该模态同时包含了El Niño衰减和La Niña发展阶段所造成的。

表 3 两个模态正负异常年 TC 特征差值

Table 3 TC characteristic difference between positive and negative years of EOF1 and EOF2

	个数	生命周期/h	初始纬度/(°)	初始经度/(°)	PDI/(10 ⁶ m ³ ·s ⁻³)	最大风速/(m·s ⁻¹)	平均风速/(m·s ⁻¹)
EOF1	1.22	-38.39**	2.99***	-4.60	-6.06**	-6.64***	-3.30***
EOF2	-3.11*	-44.08***	1.17	-7.80**	-9.51***	-3.34*	-1.50

注: *代表显著性大于90%; **代表显著性大于95%; ***代表显著性大于99%; 初始纬度和经度以北纬和东经为基准。

5 两类典型年际模态异常年份之间 TC 生成差异及其成因

TC 生成位置是影响 TC 路径的重要因子之一, 图 5c 和图 5d 显示了大尺度环境引导气流第一、第二主要年际模态下正负异常年份 TC 生成位置密度合成差异, 其中 TC 生成频数为 2°×2° 网格内 TC 生成的个数。第一主要年际模态下 WNP 东南部 (5°~15°N, 140°~170°E) 表现为 TC 生成频数负异常区域, 南海海域、WNP 北部 (15°~30°N, 120°~145°E) 则为 TC 生成频数正异常区域, 该正异常区域呈东西向带状分布。进一步分析发现, 第一主要年际模态正、负异常年 TC 生成频数分布特征呈现以 15°N 为分界的南北方向差异, 在正异常年份 TC 多生成于 15°N 以北区域, 负异常年份 TC 多生成于 15°N 以南区域, 此分布特征与大尺度环境引导气流共同作用使得该主要模态下西北行 TC 在正异常年份出现频数偏少, 而西行 TC 出现频数偏多有关。

第二主要年际模态 TC 生成频数在 WNP 东部 (10°~30°N, 135°~170°E) 呈现负异常分布特征, 在台湾东部海域 (15°~30°N, 115°~135°E) 呈现正异常分布特征, 整体呈现以 135°E 为分界的東西方向分布差异, 在正异常年 TC 多生成于 135°E 以西, 负异常年 TC 多生成于 135°E 以东, 尤其在东南象限 (10°~20°N, 140°~170°E), TC 频数显著偏少, 这使得正异常年份西北行 TC 路径频数显著偏少。

TC 生成位置分布与大尺度环境要素分布密切相关。两模态各环境要素正负异常年份差值如图 8 所示。对于第一主要年际模态, 低层 850 hPa 涡度整体呈现南北向对称分布, WNP 南部为显著的负涡度异常, 并有 500 hPa 高度处下沉运动与之相对应, 在 WNP 北部为正涡度异常及其对应的上升运动, 由于上升运动有利于 TC 生成, 该模态下正异常年 TC 生成频数呈现北多南少的分布特征。此外 WNP 北部 700 hPa 较为充足的水汽条件同样有利于 TC 生成。

对于第二主要年际模态, WPSH 的强度和面积异常对环境要素分布起着重要作用。WPSH 强度偏强,

面积偏大, 一方面使 WNP 大部分区域呈现显著的负涡度分布, 低层辐散使得菲律宾以东区域 (10°~20°N, 120°E~180°) 500 hPa 以下沉运动为主, TC 发展从而受到抑制, 另一方面, WPSH 南部的东风异常有助于输送赤道中部的干冷空气至 WNP 东南区域, 使得该区域低层水汽含量降低, 配合区域 (10°~20°N, 150°E~180°) 垂直风切变正异常, 造成正异常年份 WNP 东南区域 TC 生成频数显著偏低。

6 结论

利用中国气象局上海台风研究所整编的热带气旋最佳路径资料及 NCEP/NCAR 月平均再分析资料探究了 1979–2016 年 7–9 月西北太平洋地区两类典型大尺度引导气流年际模态与西北太平洋热带气旋活动年际变化的联系, 得出以下主要结论。

(1) WNP 地区夏季大尺度环境引导气流在年际尺度上存在两个主要模态。第一主要年际模态以 20°N 为界, 南北两侧分别为反气旋式环流和气旋式环流, 二者为经向分布的偶极型环流, 该模态以 20 世纪 90 年代中期为节点前后呈正反位相变化, 其时间系数具有显著的上升趋势。第一主要年际模态对应位于中东赤道太平洋的冷海温异常, 即东部型 ENSO, 其环流特征与 Gill 响应存在一定的联系; 第二主要年际模态以中心位于 25°N, 135°E 的反气旋式环流为主, 对应了位于中赤道太平洋的冷海温异常, 即中部型 ENSO, 并与赤道大西洋的暖海温异常有关。从海温对大尺度环流的滞后影响来看, 第一主要年际模态下从前一年春季到当年夏季海温异常分布特征表现为类 La Niña 发展为从类东部型 El Niño; 第二主要年际模态则对应类东部型 El Niño 衰减并演变为从类中部型 La Niña 的过程。

(2) 对于第一主要年际模态, WNP 北部为气旋式环流, 有垂直上升运动以及较为充足的水汽条件, 使得该模态下正异常年份 TC 在 15°N 以北生成个数偏多, 15°N 以南生成个数偏少。在北多南少的 TC 生成位置分布特征与 WNP 北部偏西引导气流的共同作用下, 正异常年份相较于负异常年份西北行路径 TC 频

数显著偏少,西行路径TC频数显著偏多。此外,由于TC生命周期偏短,从海表面吸收能量增强的时间较短,第一主要年际模态正异常年份相对于负异常年PDI、最大风速和平均风速均显著偏小。

(3)对于第二主要年际模态,WPSH南部的东风异常有助于输送赤道中部受到海表温度冷异常影响所形成的干冷空气至WNP东南区域,导致WNP东南区域低层水汽含量异常偏少,配合垂直风切变正异常及显著的负涡度异常,造成该模态下正异常年份相较于负异常年份TC在WNP东南象限($10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$)生成频数显著偏少,对应西北行路径TC频数显著偏少,此外由于WPSH东部偏北方向引导气流的

抑制作用,该模态下正异常年份近海转向型路径TC频数较少。在TC强度方面,第二主要年际模态PDI和最大风速显著偏小,造成TC路径和强度变化的主要原因是TC生成位置和大尺度环境引导气流存在明显差异,靠近西北方向的TC生成位置使得TC移动距离和生命周期偏短,不利于TC的加强发展。

本文主要考察了在不同大尺度环境引导气流的影响下,TC路径之间的年际特征差异及其对应的气候模态。不同于从ENSO等主要气候变率的角度,本文从大尺度环境引导气流这一角度出发,揭示了更多可能影响西北太平洋TC路径年际变化的海温模态,进一步凸显了不同海盆在其中的可能作用。

参考文献:

- [1] 伍荣生. 现代天气学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
Wu Rongsheng. Principles of Modern Synoptic Meteorology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [2] Chan J C L. The physics of tropical cyclone motion[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2005, 37(1): 99–128.
- [3] Wu Liguang, Wang Bin, Geng Shuqin. Growing typhoon influence on east Asia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(18): L18703.
- [4] 王斌, Elsberry R L, 王玉清, 等. 热带气旋运动的动力学研究进展[J]. *大气科学*, 1998, 22(4): 535–547.
Wang Bin, Elsberry R L, Wang Yuqing, et al. Dynamics in tropical cyclone motion: a review[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, 22(4): 535–547.
- [5] Wu Liguang, Wang Bin. Assessing impacts of global warming on tropical cyclone tracks[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(8): 1686–1698.
- [6] Ritchie E A, Holland G J. Large-scale patterns associated with tropical cyclogenesis in the western Pacific[J]. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(9): 2027–2043.
- [7] 王慧, 丁一汇, 何金海. 西北太平洋夏季风的变化对台风生成的影响[J]. *气象学报*, 2006, 64(3): 345–356.
Wang Hui, Ding Yihui, He Jinhai. Influence of western North Pacific summer monsoon changes on typhoon genesis[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(3): 345–356.
- [8] Liu K S, Chan J C L. Interdecadal variability of western North Pacific tropical cyclone tracks[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(17): 4464–4476.
- [9] 赵海坤. 全球变暖背景下西北太平洋热带气旋活动变化机理研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
Zhao Haikun. Study on the mechanism of tropical cyclone activity change over the western North Pacific under the background of global warming[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2012.
- [10] Zhao Haikun, Wu Liguang, Zhou Weican. Assessing the influence of the ENSO on tropical cyclone prevailing tracks in the western North Pacific[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(6): 1361–1371.
- [11] Zhao Haikun, Wu Liguang, Wang Ruifang. Decadal variations of intense tropical cyclones over the western North Pacific during 1948–2010[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(1): 57–65.
- [12] Zhou Xingyan, Lu Riyu, Chen Guanghua. Impact of interannual variation of synoptic disturbances on the tracks and landfalls of tropical cyclones over the western North Pacific[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(12): 1469–1477.
- [13] 苏源, 吴立广. 多时间尺度环流对热带气旋海棠(0505)路径的影响[J]. *气象科学*, 2011, 31(3): 237–246.
Su Yuan, Wu Liguang. Analysis of the multi-time scale circulation influences on the track of tropical cyclone Haitang (0505)[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, 31(3): 237–246.
- [14] Clark J D, Chu P S. Interannual variation of tropical cyclone activity over the central North Pacific[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2002, 80(3): 403–418.
- [15] 何鹏程, 江静. PDO对西北太平洋热带气旋活动与大尺度环流关系的影响[J]. *气象科学*, 2011, 31(3): 266–273.
He Pengcheng, Jiang Jing. Effect of PDO on the relationships between large scale circulation and tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, 31(3): 266–273.
- [16] Li Wenhong, Li Laifang, Deng Yi, et al. Impact of the interdecadal Pacific oscillation on tropical cyclone activity in the North Atlantic and eastern North Pacific[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12358.
- [17] Yu Cai, Han Xiang, Zhao Haikun, et al. Enhanced predictability of rapidly intensifying tropical cyclones over the western North Pacific associated with snow depth changes over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(7): 2093–2110.
- [18] Camargo S J, Sobel A H. Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(15): 2996–3006.
- [19] Zhao Haikun, Wu Liguang, Zhou Weican. Interannual changes of tropical cyclone intensity in the western North Pacific[J]. *Journal of the*

- Meteorological Society of Japan, 2011, 89(3): 243–253.
- [20] Zhao Haikun, Klotzbach P J, Chen Shaohua. Dominant influence of ENSO-like and global sea surface temperature patterns on changes in prevailing boreal summer tropical cyclone tracks over the western North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(22): 9551–9565.
- [21] Zhan Ruifen, Wang Yuqing, Lei Xiaotu. Contributions of ENSO and East Indian Ocean SSTA to the interannual variability of Northwest Pacific tropical cyclone frequency[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(2): 509–521.
- [22] Zhao Haikun, Wu Liguang. Inter-decadal shift of the prevailing tropical cyclone tracks over the western North Pacific and its mechanism study[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2014, 125(1/2): 89–101.
- [23] Wang Chao, Wang Bin, Wu Liguang. A region-dependent seasonal forecasting framework for tropical cyclone genesis frequency in the western North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(23): 8415–8435.
- [24] Wang Chao, Wang Bin. Tropical cyclone predictability shaped by western Pacific subtropical high: integration of trans-basin sea surface temperature effects[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(5/6): 2697–2714.
- [25] Wang Bin, Chan J C L. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(13): 1643–1658.
- [26] 谢佩妍, 陶丽, 李俊徽, 等. 西北太平洋热带气旋在 ENSO 发展和衰减年的路径变化[J]. *大气科学*, 2018, 42(5): 987–999.
Xie Peiyan, Tao Li, Li Junhui, et al. Variation of tropical cyclone track in the western North Pacific during ENSO developing and decaying years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(5): 987–999.
- [27] Wang Bin, Wu Renguang, Fu X. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(9): 1517–1536.
- [28] Zhang Renhe, Min Qingye, Su Jingzhi. Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: role of the anomalous western North Pacific anticyclone[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(6): 1124–1132.
- [29] 李慧敏, 徐海明, 李智玉. 厄尔尼诺年西北太平洋异常反气旋的年际变化特征及其影响[J]. *气象学报*, 2017, 75(4): 581–595.
Li Huimin, Xu Haiming, Li Zhiyu. Inter-annual variation of the western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño years and its impact[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2017, 75(4): 581–595.
- [30] 杜新观, 余锦华. ENSO 发展年与衰减年夏季环境要素对热带气旋生成频数变化的贡献[J]. *热带气象学报*, 2020, 36(2): 244–253.
Du Xinguan, Yu Jinhua. Contribution of environmental factors to the change of tropical cyclone frequency in the summer of ENSO developing and decaying years[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2020, 36(2): 244–253.
- [31] Camargo S J, Robertson A W, Gaffney S J, et al. Cluster analysis of typhoon tracks. Part I: general properties[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(14): 3635–3653.
- [32] Zhao Haikun, Lu Ying, Jiang Xianan, et al. A statistical intra-seasonal prediction model of extended boreal summer western North Pacific tropical cyclone genesis[J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(8): 2459–2478.
- [33] Ying Ming, Zhang Wei, Yu Hui, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287–301.
- [34] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437–472.
- [35] 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[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D14): 4407.
- [36] 董克勤, 刘治军. 台风路径与各等压面上基本气流的关系[J]. *气象学报*, 1965, 35(2): 132–137.
Dong Keqin, Liu Zhijun. The relationship between the typhoon track and the basic steering flow on each isobaric surface[J]. *Acta Meteorol Sin*, 1965, 35(2): 132–137.
- [37] George J E, Gray W M. Tropical cyclone motion and surrounding parameter relationships[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1976, 15(12): 1252–1264.
- [38] Chan J C L, Gray W M. Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships[J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(10): 1354–1374.
- [39] Gray W M. Summary of ONR sponsored tropical cyclone motion and future plans[R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1982.
- [40] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7): 699–706.
- [41] Yu Jinhua, Zheng Yingqing, Wu Qishu, et al. K-means clustering for classification of the northwestern Pacific tropical cyclone tracks[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2016, 22(2): 127–135.
- [42] Wang Chunzai, Li Chunxiang, Mu Mu, et al. Seasonal modulations of different impacts of two types of ENSO events on tropical cyclone activity in the western North Pacific[J]. *Climate Dynamics*, 2013, 40(11/12): 2887–2902.
- [43] Roeckner E, Arpe K, Bengtsson L, et al. The atmospheric general circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate[R]. Hamburg: Max-Planck-Institut fuer Meteorologie, 1996: 90.
- [44] Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. *Nature*, 2005, 436(7051): 686–688.
- [45] Li R C Y, Zhou Wen, Shun Chiming, et al. Change in destructiveness of landfalling tropical cyclones over China in recent decades[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(9): 3367–3379.

Two leading modes of environmental steering flow in the interannual time scale and their associations with tropical cyclone activity over the western North Pacific

Yang Xinwei¹, Shao Yuhang¹, Zhao Haikun¹, Han Xiang², Zhou Yufeng³, Jiang Mingbo³

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Pacific Typhoon Research Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316000, China; 3. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100082, China)

Abstract: Using the tropical cyclone (TC) best track data from the Shanghai Typhoon Research Institute of the China Meteorological Administration (CMA-STI) and the monthly mean reanalysis data of NCEP/NCAR, the interannual variability of the basin-scale large-scale environmental steering flow and the tropical cyclone activity in the western North Pacific (WNP) during peak season from July to September from 1979–2016 are investigated. The results show that: (1) There are two typical modes of summer large-scale environmental steering flow in the WNP at the inter-annual scale. The first typical mode is a dipole circulation with a meridional distribution, which is closely related to the eastern ENSO and the sea-air coupling mode in the WNP region. (2) The TC activity (generation location, tracks, intensity and duration) differs significantly between the two typical interannual mode anomaly years of the large-scale environment steering flow, but the differences have distinctly different characteristics for the two typical inter-annual modes. (3) The spatial distribution of TC generation location shows significant differences from north to south between the years of the first typical interannual mode anomalies of large-scale environment steering flow; the TC tracks, especially the northwestward and westward prevailing tracks, also have significant differences, and their average duration and intensity also show their corresponding significant differences. In the second major interannual mode anomaly years, the TC generation locations show significant east-west distribution especially in the southeast quadrant, and the differences in TC tracks are mainly in the northwestward and offshore steering prevailing tracks, and their mean durations and intensities also show significant differences.

Key words: large-scale steering flow; western North Pacific; tropical cyclone activity; sea surface temperature anomaly; inter-annual scale