Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2022.01.004

1979—2019 年影响中国沿海的热带气旋与 ENSO 变化关系初探

于茜倩[1]，谢冬梅[1]，陈永平[1]，朱业[2]
（1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院，江苏 南京 210098；2. 浙江省海洋监测预报中心，浙江 杭州 310007）

摘 要： 采用 1979—2019 年热带气旋最佳路径资料，分析影响中国沿海的热带气旋的时空演变特征，并结合 Niño3.4 指数、海表温度和海洋上层热容量资料，对热带气旋与 ENSO 变化关系进行初步探讨。结果表明，近 40 年来影响中国沿海的热带气旋经历了 1990 年代减弱，2000 年代增强的变化过程，且在 2000 年以后呈现显著向岸迁移趋势。影响中国沿海的热带气旋与表征 ENSO 的 Niño3.4 指数的相关关系在 2000 年发生突变，具体表现为 ACE 与 Niño3.4 指数在 2000 年前呈显著正相关，2000 年后二者相关性明显下降。通过将 ACE 分解成平均强度 ACE_1、持续时间 ACE_2 和频数 ACE_3 这三个分量，发现 2000 年前 Niño3.4 指数与平均强度 ACE_1 呈显著正相关，但 2000 年后 Niño3.4 指数与 ACE_1 相关关系减弱，这可能是导致 ACE 与 Niño3.4 指数的相关关系在 2000 年左右发生突变的主要原因。持续时间 ACE_2 与 Niño3.4 指数一直保持显著正相关，频数 ACE_3 则与 Niño3.4 指数不存在显著线性相关关系。分析影响中国沿海的热带气旋活动与海表温度异常和海洋上层热容量异常在空间上的相关性，所得结果可以证实以上结论。

关键词： 热带气旋；累积气旋能量；ENSO；海表温度；海洋上层热容量
中图分类号： P732.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-6932(2022)01-0029-10

A preliminary study on the relationship between tropical cyclones affecting the coastal areas of China and ENSO during 1979—2019

YU Qianqian[1], XIE Dongmei[1], CHEN Yongping[1], ZHU Ye[2]
(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Zhejiang Marine Monitoring and Forecasting Center, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Tropical cyclones are one of the most devastating natural disasters in terms of their average destructiveness and annual frequency affecting coastal regions. By using the best-track dataset of tropical cyclones, Niño3.4 index, sea surface temperature, upper ocean heat content and other indices of tropical cyclone activities were used to analyze the spatiotemporal variability of typhoon activities affecting the coast of China during 1979—2019. The Accumulated Cyclone Energy (ACE), mean intensity and lifetime variables of tropical cyclones presented strong interdecadal variations, decreasing in the 1990s and increasing in the 2000s. Coastal migration of tropical cyclone activities was also identified after 2000 in the CMA best-track dataset. The ACE and Niño3.4 index presented positive correlation before 2000, with larger ACE value in El Niño years and smaller value in La Niña years. However, the correlation between ACE and Niño3.4 index experienced an abrupt decrease around the year of 2000. After 2000, variations in the ACE were not synchronized with Niño3.4 index, which may be mainly contributed by the mean intensity (ACE_1) variation. While the duration of tropical cyclones (ACE_2) was significantly

收稿日期：2021-08-14；修订日期：2021-11-07
基金项目：河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室开放基金（201908）；河海大学中央高校基本科研业务费项目（B210202020；B200204017）
作者简介：于茜倩（1996—），硕士研究生，主要从事海岸风暴灾害与防灾减灾研究。电子邮箱：303055419@qq.com
通讯作者：谢冬梅，博士，主要从事河口海岸防灾减灾与海气耦合过程研究。电子邮箱：dmxie@hhu.edu.cn

modulated by the sea surface temperature anomalies in Niño3.4 regions, the frequency of tropical cyclones (ACE_3) was not linearly correlated with that. The result was confirmed by analyzing the spatial distribution of the correlation between tropical cyclones affecting the coast of China and sea surface temperature anomalies as well as upper ocean heat content anomalies.
Keywords: tropical cyclones; accumulated cyclone energy; ENSO; sea surface temperature; upper ocean heat content

我国地处西北太平洋，海域开阔，是受热带气旋影响最严重的国家之一。近年来，多个超强台风（如1713“天鸽”、1822“山竹”、1909“利奇马”）频繁登陆我国沿海，给沿海防洪安全乃至区域经济发展带来了严峻挑战[1]。分析影响我国沿海的热带气旋的时空演变特征，可以为沿海防灾减灾工作提供理论依据和数据支撑。

在气候变化背景下，近40年全球范围内热带气旋向陆迁移显著，沿海区域热带气旋活动总体呈现上升趋势，但是不同海盆区域的热带气旋活动变化特点呈现出一定差异[2]。西北太平洋作为全球热带气旋活动最剧烈的海域之一，其热带气旋的时空演变特征受到广泛关注。已有研究表明，西北太平洋热带气旋发生频率在20世纪末明显下降，但台风强度有所增加[3-6]。同时，西北太平洋热带气旋向陆、向北迁移，导致沿海地区热带气旋风险增加[7-10]。在此背景下，影响中国沿海的热带气旋是否与西北太平洋热带气旋有相同趋势，还有待深入研究。

大尺度海洋-大气过程变异是导致热带气旋时空分布变化的主要原因[11-14]。海表温度作为海气相互作用的重要边界条件，且为较容易观测的海洋参数，其与热带气旋的关系一直备受关注。以往研究表明，西北太平洋海盆热带气旋活动的年际变化与厄尔尼诺-南方涛动（El Niño-Southern Oscillation，ENSO）有关[15]。ENSO是全球海气相互作用变率中最主要的信号，具体表现为热带中东太平洋海水表面温度的异常变暖或变冷[16]。在海温异常变化时，相应Walker环流、季风槽位置、副热带高压也会发生变化，进而改变大尺度环流[17-19]。随着热带大洋上的大尺度环流发生改变，海水表面温度、对流层中层相对湿度等热力学因子和低层相对涡度、垂直风切变等动力学因子也会发生变化，对热带气旋生成位置以及移动路径的变化产生显著影响[20-24]。

基于此，有学者将ENSO指数作为西北太平洋热带气旋活动年际变化的预测因子[25-28]。Wang等发现西北太平洋热带气旋活动对ENSO强度具有正反馈作用，并以西北太平洋东南部热带气旋的累积气旋能量（Accumulated Cyclone Energy，ACE）作为预测因子构建ENSO预报经验模型[28]。然而，随着热带气旋活动向西和向北迁移，热带气旋活动与ENSO之间的关系如何随时间变化仍有待探索。

以往针对影响中国沿海的热带气旋讨论多基于单一参数（频数、强度、路径、登陆位置等）开展，不能很好地反映热带气旋综合强度的变化特征[29-31]。本研究从热带气旋综合指标“累积气旋能量”的角度出发，研究影响中国沿海的热带气旋时空演变特征以及与ENSO关系的变化。在此基础上，通过分析热带气旋变化与海表温度异常和海洋上层热容量异常在空间上的相关性，进一步证实所得结果的合理性。

1 数据来源

1.1 热带气旋数据

本文使用的热带气旋资料来源于中国气象局热带气旋资料中心提供的“CMA最佳路径数据集”[32-33]。考虑到20世纪70年代末卫星技术开始应用于热带气旋监测，热带气旋观测数据的可靠性和准确性大幅提高，本文研究年限选为1979—2019年。由于热带低压破坏力基本可以忽略，本文只考虑热带风暴（即中心附近地面最大风速≥17.2 m/s）及其以上级别的热带气旋。影响中国沿海的热带气旋主要集中发生在每年7-10月，因此本文主要探讨7—10月热带气旋活动的时空演变特征（下文所有资料均为同期资料）。本文以进入中央气象台热带气旋48 h警戒线作为标准（图1红色折线），共遴选出519个影响我国沿海的热带气旋。

1.2 Niño3.4指数和海洋数据

Niño3.4指数采用美国国家环境预测中心的尼诺指数（Oceanic Niño Index，ONI），在具体应用时，一般采用连续3个月的尼诺指数滑动平均值作为月Niño3.4指数[34-35]。本研究以7—10月的月

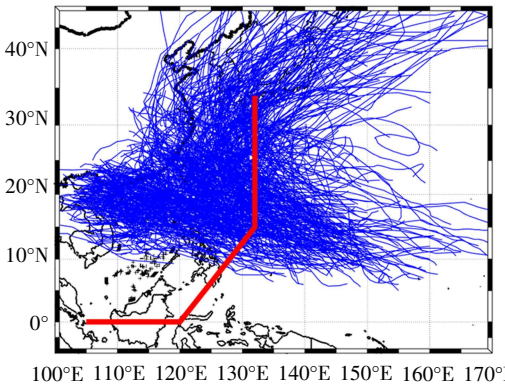


图 1　1979—2019 年影响中国沿海的历史热带气旋路径集合

Niño3.4 指数平均值作为 7—10 月的 Niño3.4 指数，将平均值≥0.5 的年份定义为 El Niño 年，平均值≤–0.5 的年份定义为 La Niña 年，其余年份定义为平常年[36]。

采用两个全球海洋表面温度数据集：美国国家海洋和大气管理局全球月平均海表温度数据集 ERSST.v5（空间分辨率为 2°）和英国气象局全球海温资料 HadISST.v1.1（空间分辨率为 1°）[37–38]。由于 Niño3.4 指数表征 Niño3.4 区域（5°N—5°S，170°W—120°W）的海表温度异常值，基于下文验证分析的需要，对上述两个全球海表温度数据集进行与 Niño3.4 指数相同的计算步骤，得到两个海表温度异常值的数据集。本文采用这两个数据集，可以交叉检验结果的准确性。

全球上层 700 m 海洋热含量（Upper 700 m Ocean Heat Content，OHC700）月平均数据来自中国科学院大气物理研究所构建的全球海洋温/盐格点数据，空间分辨率为 1°[39]。

2　研究方法

2.1　综合指标

采用综合指标开展沿海区域热带气旋研究，可以掌握区域尺度上热带气旋综合强度的特征。本文以“累积气旋能量”为综合指标，讨论影响中国沿海的热带气旋时空演变特征[40]。该指标综合考虑热带气旋的频数、持续时间以及近中心最大风速，从动能释放的角度反映热带气旋活动的综合强度[41–43]。*ACE* 的计算公式如下：

$$ACE = \sum_{1}^{N}\sum_{t_{0i}}^{t_{fi}} v^2\ (t) \tag{1}$$

式中：$v(t)$为 t 时刻的热带气旋近中心最大风速；i 为单个热带气旋序号；t_{0i} 和 t_{fi} 为单个热带气旋的开始和结束时间；N 为研究时段（每年的 7—10 月）内热带气旋数量。

为了明确平均强度、持续时间和频数对 *ACE* 指标的贡献，参考 Camargo 等构造变量的方法，对 *ACE* 进行分解，公式如下[44]：

$$ACE_1 = \langle L\rangle\langle N\rangle\widetilde{U} \tag{2}$$

$$ACE_2 = \langle U\rangle\langle N\rangle\widetilde{L} \tag{3}$$

$$ACE_3 = \langle U\rangle\langle L\rangle\widetilde{N} \tag{4}$$

式中：$U_i=K_i/L_i$，代表单个热带气旋强度；$K_i=\sum_{t_{0i}}^{t_{fi}} v^2(t)$，代表单个热带气旋累积气旋能量；$L_i=\sum_{t_{0i}}^{t_{fi}}\Delta t$，代表单个热带气旋持续时间，$\Delta t$ 是时间步长（此处为 6 h）。尖括号代表样本中所有年份的热带气旋平均值，而波浪号仅代表每年的热带气旋平均值。因此，ACE_1 具有 *ACE* 的维度和典型大小，它表示在持续时间和热带气旋个数都不变化的情况下，仅由于年平均强度变化而获得的 *ACE*。同理，ACE_2 代表只有持续时间在变化的 *ACE*，ACE_3 代表只有热带气旋个数在变化的 *ACE*。

2.2　研究方法

首先对 CMA 最佳路径数据集资料进行筛选与整理，得到 1979—2019 年进入 48 h 警戒线的热带气旋，采用平滑法、小波分析法研究 1979—2019 年影响中国沿海的热带气旋趋势性和周期性变化；然后将 *ACE*、ACE_1、ACE_2、ACE_3 分别与 Niño3.4 指数进行相关性分析，探讨 ENSO 与影响中国沿海的热带气旋之间的相关性是否发生变化；最后通过分析影响中国沿海的热带气旋分别与海表温度异常和海洋上层热容量异常在空间上的相关性，进一步证实研究成果的合理性。

3　结果分析

3.1　热带气旋时间变化特征

图 2 为 1979—2019 年影响中国沿海的热带气旋综合强度 *ACE*、平均强度 ACE_1、持续时间 ACE_2 和频数 ACE_3 的时间序列变化。七点二次平滑是对时间序列进行削峰处理的常用方法，起到低通滤波

器作用，以展示出变化趋势，同时可以克服滑动平均削弱过多波幅的缺点。此处分别对 ACE、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 时间序列进行七点二次多项式拟合，图 2 中用黑色折线表示。以年代为单位来看，ACE 在 1980 年代较为稳定，1990 年代总体呈现持续下降势态，2000 年代有一个先上升再下降的波动，2010 年代持续上升。ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 波动规律相比 ACE 不明显。灰色点线所代表的最大风速、持续时间和频数与构造变量 ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 的变化一致（相关系数均达 0.9 以上），说明构造变量能反映热带气旋相应的参数变化，可用于分析。

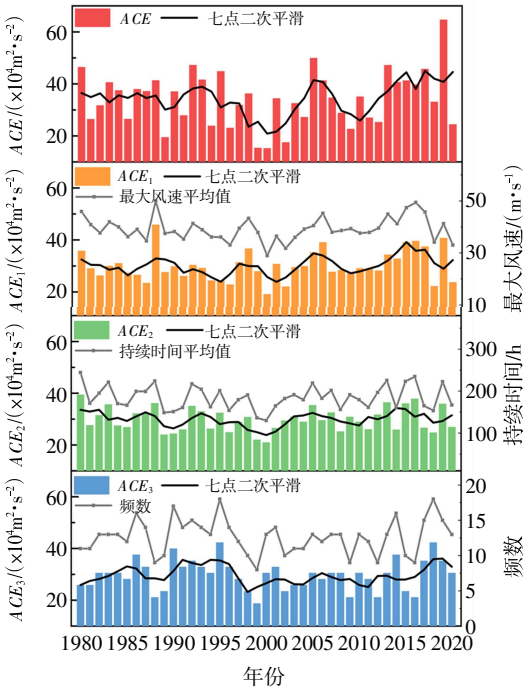
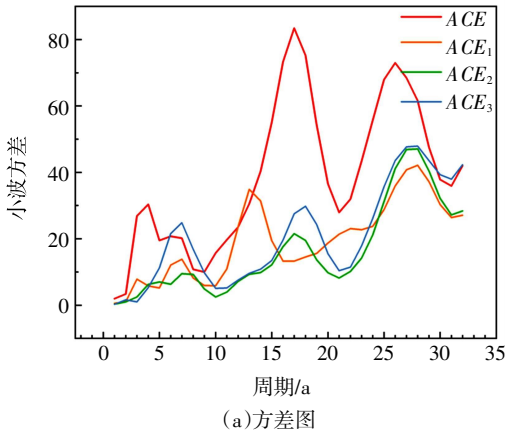


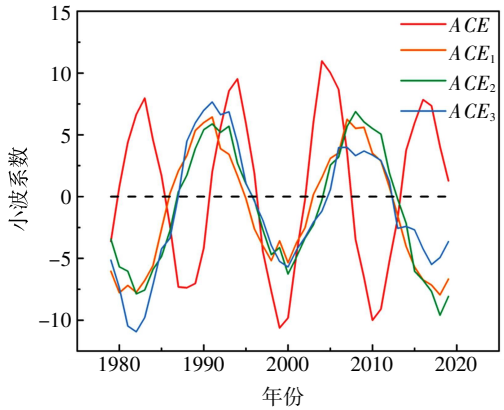
图 2 ACE、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 时间序列变化

为了准确得到 1979—2019 年 ACE、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 的变化周期，对其相应序列进行小波分析（见图 3）。图 3(a)中 ACE、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 的第一主周期分别为 17 年、28 年、28 年和 28 年，图 3(b)是 ACE、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 第一主周期的小波系数图。ACE 在 17 年的特征时间尺度上，变化的平均周期为 11 年左右，ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 在 28 年的特征时间尺度上，变化的平均周期均为 17 年左右。

为了检验热带气旋的变化是否达到了统计学意义上的突变，对 ACE、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 进行滑动 t 检验（滑动窗口取 10 年）。滑动 t 检验的 t



(a)方差图



(b)第一主周期的小波系数图

图 3 ACE、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 的小波分析

值反映了前后相邻子序列的均值差异（前减后），在本文中，t 值大于 0 表示该年份前 10 年的均值大于该年份后 10 年的均值，小于 0 反之。如图 4 所示，ACE 的 t 值在 1988—1998 年均大于 0，1999—2009 年均小于 0。这说明到 1998 年为止，ACE 序列在年代际尺度上一直在减小；从 1999 年开始，ACE 序列在年代际尺度上开始增大。总体来看，ACE 经历了 1990 年代下降，2000 年代上升的过程。其中 1992 年和 1994 年 ACE 的 t 值超过正临界值，说明这两年前后 10 年的均值差异超过了 0.1 的显著性水平，发生下降突变；相反，2003 年和 2008 年 ACE 的 t 值超过了负临界值，发生上升突变。ACE_1、ACE_2 达到突变的时间较 ACE 有 1~2 a 的时间差，但 t 值曲线的变化趋势与 ACE 是一致的，这说明热带气旋综合强度和平均强度、持续时间的变化是相似的，而代表频数的 ACE_3 变化相对 ACE、ACE_1 和 ACE_2 来说有所滞后。

3.2 热带气旋与 ENSO 的关系

表 1 是 1979—2019 年的 ENSO 事件年以及对

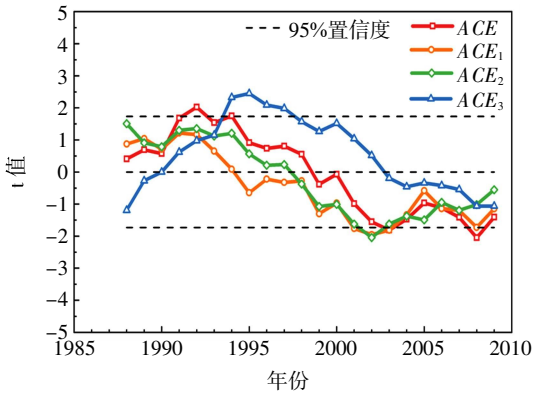


图 4　*ACE*、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 滑动 t 检验

应年份影响中国沿海的热带气旋 *ACE*，其中有 10 a 发生 El Niño 事件，9 a 发生 La Niña 事件，其余为正常年份。表 1 中 El Niño 年的 *ACE* 普遍比 La Niña 年的 *ACE* 大，说明 El Niño 年影响中国沿海的热带气旋整体活动普遍比 La Niña 年强。这与ENSO 事件年西北太平洋热带气旋活动的表现相同[45-46]。

表 1　1979—2019 年的 ENSO 事件及 *ACE*

El Niño 年			La Nina 年		
年份	Niño3.4 指数	*ACE* /($\times10^4 m^2\cdot s^{-2}$)	年份	Niño3.4 指数	*ACE* /($\times10^4 m^2\cdot s^{-2}$)
1982	1.4	40.6	1988	−1.3	19.5
1986	0.6	37.2	1995	−0.6	23.1
1987	1.6	41.4	1998	−1.1	15.4
1991	0.7	47.3	1999	−1.2	15.3
1994	0.5	44.9	2000	−0.6	34.5
1997	2.0	36.3	2007	−0.9	28.9
2002	1.0	32.6	2010	−1.4	27.1
2004	0.6	50.0	2011	−0.7	25.3
2009	0.7	35.2	2016	−0.6	45.8
2015	2.0	39.8			

图 5 为 1979—2019 年 Niño3.4 指数和 *ACE*、ACE_1、ACE_2、ACE_3 的变化过程。在强 El Niño 年中，除 1997 年、2002 年和 2015 年外，*ACE* 都是大值。相比之下，除 2007 年、2010 年和 2016 年外，*ACE* 在 La Niña 年均较小。值得注意的是，以上这些异常很多都发生在 2000 年以后。在 2000 年以前，*ACE* 总体上与 Niño3.4 指数同步波动，但 2000 年以后同步性明显降低。

从图 5 可以看出，平均强度 ACE_1 在强 El Niño 年（1982 年和 2002 年除外）达到峰值；但在强 La Niña 年并不是小值；持续时间 ACE_2 与 Niño3.4 指数同相波动，即 El Niño 年较大，La Niña 年较小（1997 年和 2002 年除外）；频数 ACE_3 则与 Niño3.4 指数无明显同相波动。

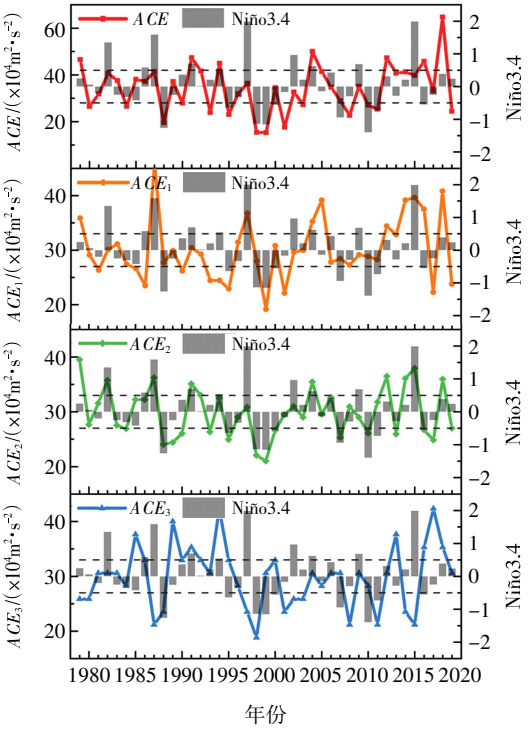


图 5　Niño3.4 指数与 *ACE*、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 的时间序列

将 Niño3.4 指数分别与 *ACE*、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 做滑动相关（滑动窗口取 17 a），结果如图 6 所示。以 2000 年为界，计算得到 1979—1999 年和 2000—2019 年 Niño3.4 指数分别与 *ACE*、ACE_1、ACE_2、ACE_3 的相关系数（见表 2）。1979—1999 年 *ACE* 与 Niño3.4 指数显著正相关，相关系数达到 0.659（超过 95%置信度），2000—2019 年 *ACE* 与 Niño3.4 指数的相关性有明显下降，相关系数只有 0.328。分解来看，ACE_1 与 Niño3.4 指数的相关性在 2000 年有明显下降，从 0.592 降到 0.333；ACE_2 与 Niño3.4 指数一直保持着显著的相关性；ACE_3 与 Niño3.4 指数并不呈线性相关。研究发现，分量（ACE_1、ACE_2 和 ACE_3）与 Niño3.4 指数的相关性变化对 *ACE* 与 Niño3.4 指数的相关性变化有着不同的贡献。其中，2000 年以后平均强度 ACE_1 与 Niño3.4 指数的相关性降低可能是 *ACE* 与 Niño3.4 指数的相关性突变的主要原因。

3.3　热带气旋空间变化特征

事实上，影响中国沿海的热带气旋空间分布

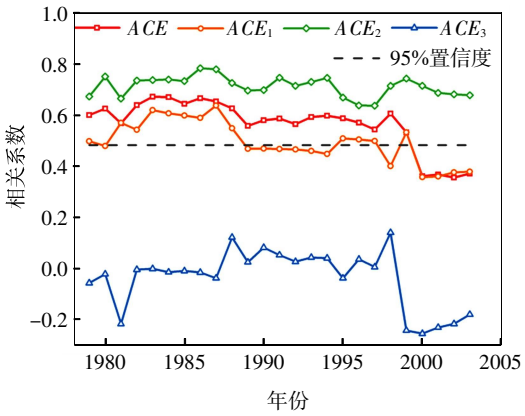


图 6 Niño3.4 指数分别与 *ACE*、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 的滑动相关

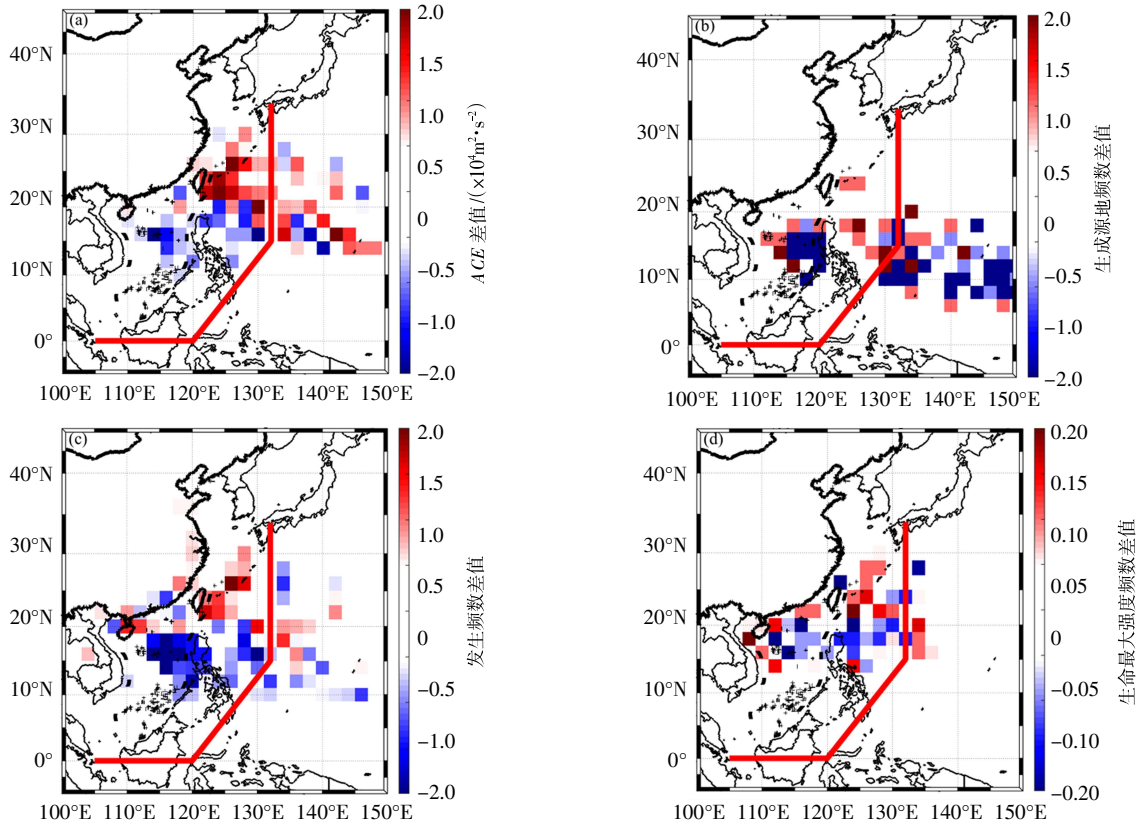
表 2 1979—1999 年和 2000—2019 年 Niño3.4 指数分别与 *ACE*、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 的相关系数

	Niño3.4 指数与 *ACE* 的相关系数	Niño3.4 指数与 ACE_1 的相关系数	Niño3.4 指数与 ACE_2 的相关系数	Niño3.4 指数与 ACE_3 的相关系数
1979—1999 年	0.659*	0.592*	0.685*	0.010
2000—2019 年	0.328	0.333	0.670*	−0.213

注：“*”标注表示该项通过 $\alpha = 0.05$ 的显著检验。

在2000 年也发生了阶段性变化。如图 7(a)所示，相较于 1979—1999 年，2000—2019 年 ACE 的空间分布整体向北迁移；48 h 警戒线内，华南附近海域的热带气旋活动强度有所减小，而华东附近海域的热带气旋活动强度明显增强，增加区域整体沿西北路径发展。这与之前研究发现华东地区受热带气旋影响增大、华南地区受热带气旋影响减小的现象一致[47-50]。

分别从生成源地、频数、生命最大强度的空间分布来分析 *ACE* 分布产生变化的原因。如图 7(b)所示，1979—1999 年和 2000—2019 年生成源地的差值分布发生较大的变化，2000 年后热带气旋整体生成数量有所减少，且生成源地呈现北向迁移和西向迁移的变化，导致近岸区域热带气旋生成数目有明显增加，尤其在 48 h 警戒线内。图 7(c)和图 7(d)分别为两阶段热带气旋频数和生命最大强度所在位置的差值，从图中可以看出，热带气旋的路径和达到生命最强的位置也存在西向迁移和北向迁移。由此可见，影响中国沿海的热带气旋活动强度



(a) ACE； (b) 生成源地； (c) 频数； (d) 生命最大强度频数

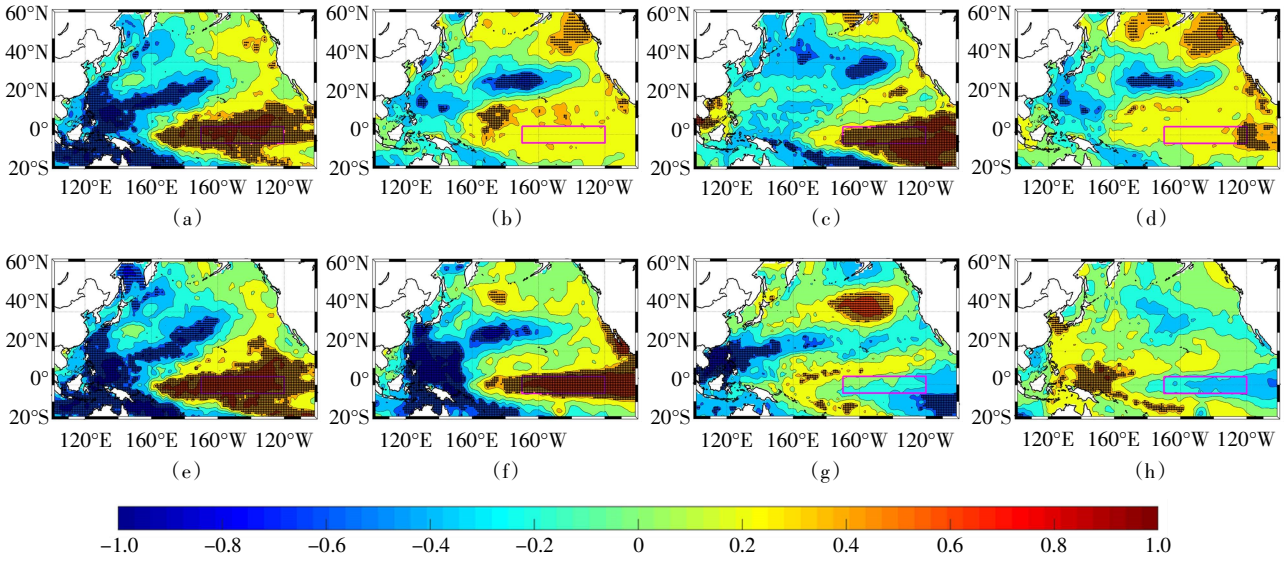
图 7 2000—2019 年和 1979—1999 年影响中国沿海的热带气旋空间分布差值场

注：2000—2019 年减 1979—1999 年；红色折线是 48 h 警戒线

在 2000 年以后有向岸迁移的变化，是生成源地和盛行路径的向西、向北迁移的共同作用结果。这与近期 Shan 等基于西北太平洋热带气旋变化的研究结论基本一致[51-52]。

3.4　热带气旋与海表温度异常的关系

图 8 为 1979—1999 年和 2000—2019 年 ACE、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 分别与太平洋海表温度异常的相关系数分布。2000 年以前 ACE 与海表温度异常的显著正相关区域集中在以 Niño3.4 区域为中心的中东太平洋地区，显著负相关范围呈“K”型分布于西侧；2000 年后显著正相关区域分布较为分散，一部分在 Niño3.4 区域左侧，一部分在太平洋东岸中高纬度。对比同时段 ACE_1、ACE_2、ACE_3 与海表温度异常的相关性时空分布差异发现，ACE_1 与海表温度异常的显著正相关区域从 Niño3.4 区域变化到太平洋东岸中高纬度区域。而 ACE_2 与海表温度异常的相关性分布在前后两阶段基本不变，均集中在 Niño3.4 区域。以上结果说明，与影响中国沿海的热带气旋平均强度相关的海温异常区域在 2000 年前后发生转移，而影响热带气旋持续时间的海域基本没有变化，这与前文中得到的“2000 年以后，平均强度 ACE_2 与 Niño3.4 指数的相关性降低可能是 ACE 与 Niño3.4 指数的相关性突变的主要原因”结论相一致。



(a)(b)：ACE；(c)(d)：ACE_1；(e)(f)：ACE_2；(g)(h)：ACE_3；(a)(c)(e)(g)：1979—1999 年；(b)(d)(f)(h)：2000—2019 年

图 8　1979—1999 年和 2000—2019 年 ACE、ACE_1、ACE_2 和 ACE_3 分别与海表温度异常的相关系数分布

注：黑点区域代表相关系数通过 95%的信度检验；红色框代表 Niño3.4 区域

2000 年以前，ACE_2 与海表温度异常的相关性分布（图 8(e)）和 ACE 与海表温度异常的相关性分布（图 8(a)）相似，而 2000 年以后 ACE_1 与海表温度异常的相关性分布（图 8(d)）和 ACE 与海表温度异常的相关性分布（图 8(b)）相似，这说明2000 年前海表温度主要是通过热带气旋的持续时间来影响热带气旋的整体强度；2000 年后则主要是通过热带气旋的平均强度来影响热带气旋的整体强度。需要说明的是，图 8 使用的海表温度数据是分辨率为 1°的 HadISST.v1.1 再分析资料，所得结果与基于 Niño3.4 指数同源的再分析资料 ERSST.v5（分辨率为 2°）的分析结果一致。受篇幅限制，本文不再赘述。

3.5　热带气旋与海洋上层热容量异常的关系

热带气旋的热量来源取决于整个海洋上层的热容量，海表温度仅是一个边界条件，海洋上层的热含量更具稳定性，与热带气旋相关联更能体现出海洋对大气系统的强迫作用[53-57]。图 9 为 1979—1999 年和2000—2019 年 ACE 与海洋上层 700 m 热容量异常进行相关分析结果。对比图 8 和图 9 可以发现，虽然分布存在略微不同，但 Niño3.4 区域所呈现出来的变化特征是相似的，这说明与热带气旋整体活动强度相关的海洋上层热含量区域在 2000 年也发生了改变。由此可见，影响中国沿海的热带气旋所发生的变化与西北太平洋海洋上层热容量异常区域的转移也存在密切关系。

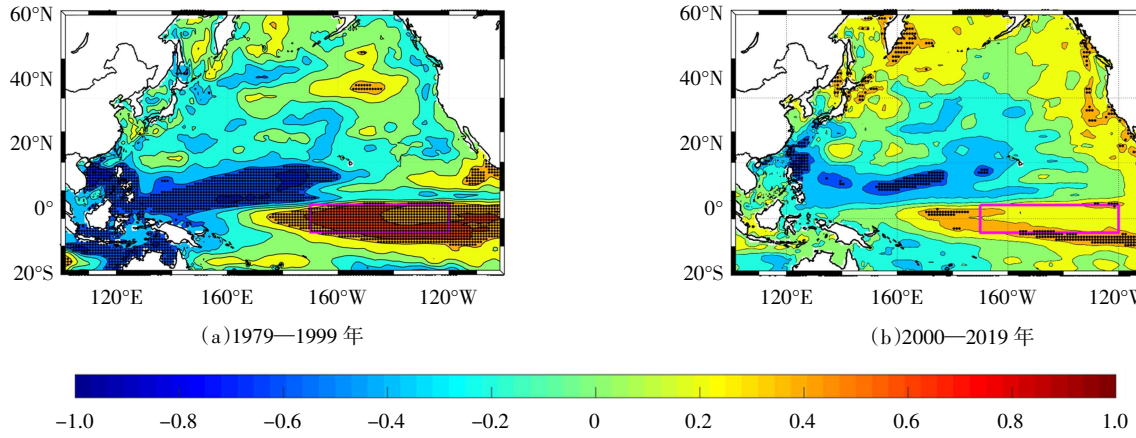


图 9 1979—1999 年和 2000—2019 年 *ACE* 与海洋上层 700 m 热容量异常的相关系数分布

注：黑点区域代表相关系数通过 95%的信度检验；红色框代表 Niño3.4 区域

4 结论

本文采用中国气象局热带气旋资料中心提供的西北太平洋热带气旋最佳路径观测数据，选取进入中央气象台 48 h 警戒线的热带气旋为研究样本，对 1979—2019 年影响中国沿海的热带气旋要素进行统计，分析热带气旋的时空演变特征。结合 Niño3.4 指数、海表温度异常、海洋上层 700 m 热容量异常现象，探讨了热带气旋与 ENSO 关系的变化。主要结论如下：

（1）近 40 年来影响中国沿海的热带气旋整体活动强度呈现 1990 年代减弱、2000 年代增强的变化特征。2000 年以后热带气旋空间分布有向岸迁移的变化，与生成源地和盛行路径的西向和北向迁移变化有关。

（2）影响中国沿海的热带气旋与 ENSO 的相关关系在 2000 年发生突变，具体表现为：1979—1999 年 *ACE* 与 Niño3.4 指数显著正相关，2000—2019 年 ACE 与 Niño3.4 指数的相关性有明显下降。热带气旋各参数与 Niño3.4 指数的相关性变化对 *ACE* 与 Niño3.4 指数的相关性变化有着不同的贡献，其中 2000 年以后平均强度 ACE_1 与 Niño3.4 指数相关性的降低可能是 *ACE* 与 Niño3.4 指数的相关性突变的主要原因。

（3）通过将影响中国沿海的热带气旋分别与海表温度异常和海洋上层热容量异常进行相关性分析，发现显著正相关区域在 2000 年前后均发生空间分布变化。2000 年以后，与热带气旋平均强度显著正相关的海温异常区域转移，但是与热带气旋持续时间显著正相关的海温异常区域依然集中在 Niño3.4 区域。

考虑到 2000 年后 Niño3.4 指数并不能有效预测影响中国沿海的热带气旋活动的年际变化，因此对基于 ENSO 指数来预测未来热带气旋变化趋势的合理性需要做进一步检验。与此同时，影响中国沿海的热带气旋活动及其与 ENSO 指数相关性在2000 年左右发生变化的物理机制值得进一步探究。

参 考 文 献

[1] 齐庆华，蔡榕硕，颜秀花. 气候变化与我国海洋灾害风险治理探讨[J]. 海洋通报，2019，38(4)：361-367.

[2] WANG S，TOUMI R. Recent migration of tropical cyclones toward coasts[J]. Science，2021 371(6528)：514-517.

[3] WU L，WANG B，GENG S. Growing typhoon influence on East Asia[J]. Geophysical Research Letters，2005，32(18)：205-211.

[4] HOLLAND G，BRUYERE C L. Recent intense hurricane response to global climate change[J]. Climate Dynamics，2014，42(3)：617-627.

[5] HUANGFU J，HUANG R，CHEN W，et al. Interdecadal variation of tropical cyclone genesis and its relationship to the monsoon trough over the western North Pacific[J]. International Journal of Climatology，2017，37(9)：3587-3596.

[6] ZHAO J，ZHAN R，WANG Y，et al. Contribution of the interdecadal Pacific oscillation to the recent abrupt decrease in tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific since 1998 [J]. Journal of Climate，2018，31(20)：8211-8224.

[7] KOSSIN J P，EMANUEL K A，VECCHI G A. The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity[J]. Nature，2014，509(7500)：349-352.

[8] 单璐璐，朱丹，宋若宁，等. 西北太平洋台风路径变化趋势分析[J]. 现代农业科技，2017(19)：228-230.

[9] SONG J,KLOTZBACH P J. What has controlled the poleward migration of annual averaged location of tropical cyclone lifetime maximum intensity over the western North Pacific since 1961?[J]. Geophysical Research Letters,2018,45(2):1148-1156.

[10] SHAN K,YU X. Enhanced understanding of poleward migration of tropical cyclone genesis [J]. Environmental Research Letters,2020,15(10):104062.

[11] 赵海坤，吴立广. 西北太平洋热带气旋气候变化的若干研究进展[J]. 气象科学,2015,35(1):108-118.

[12] WALSH K J E,MCBRIDE J L,KLOTZBACH P J,et al. Tropical cyclones and climate change[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews:Climate Change,2016,7(1):65-89.

[13] KNUTSON T,CAMARGO S J,CHAN J C L,et al. Tropical cyclones and climate change assessment:Part I:Detection and attribution[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2019,100(10):1987-2007.

[14] 周磊,陈大可,雷小途,等. 海洋与台风相互作用研究进展[J]. 科学通报,2019,64(1):60-72.

[15] CHAN J C L. Tropical cyclone activity in the northwest Pacific in relation to the El Niño/Southern Oscillation phenomenon[J]. Monthly Weather Review,1985,113(4):599-606.

[16] WANG C. A review of ENSO theories[J]. National Science Review,2018,5(6):813-825.

[17] WU M C,CHANG W L,LEUNG W M. Impacts of El Niño-Southern Oscillation events on tropical cyclone landfalling activity in the western North Pacific[J]. Journal of Climate,2004,17(6):1419-1428.

[18] 冯涛,黄荣辉,陈光华,等. 近年来关于西北太平洋热带气旋和台风活动的气候学研究进展[J]. 大气科学,2013,37(2):364-382.

[19] 陈大可,雷小途,王伟,等. 上层海洋对台风的响应和调制机理[J]. 地球科学进展,2013,28(10):1077-1086.

[20] ZHAO H,WU L,ZHOU W. 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.

[21] 韩林生,高佳,郭俊如,等. 上层海洋对热带气旋的响应与反馈研究进展[J]. 海洋通报,2012,31(2):233-239.

[22] DIAMOND H J,LORREY A M,RENWICK J A. A southwest Pacific tropical cyclone climatology and linkages to the El Niño-Southern Oscillation[J]. Journal of Climate,2013,26(1):3-25.

[23] YU J,CHEN C,LI T,et al. Contribution of major SSTA modes to the climate variability of tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2016,142(695):1171-1181.

[24] 刘颖婧,陈永平,甘敏,等. 1951—2016 年影响我国热带气旋的强度变化特征及其与 ENSO 的关系[J]. 应用海洋学学报,2018,37(3):301-312.

[25] CHAN J C L,SHI J,LAM C. Seasonal forecasting of tropical cyclone activity over the Western North Pacific and the South China Sea[J]. Weather and Forecasting,1998,13(4):997-1004.

[26] CHAN J C L,SHI J,LIU K S. Improvements in the seasonal forecasting of tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. Weather and Forecasting,2001,16(4):491-498.

[27] ZHAN R,WANG Y,YING M. Seasonal forecasts of tropical cyclone activity over the western North Pacific:A review[J]. Tropical Cyclone Research and Review,2012,1(3):307-324.

[28] WANG Q,LI J,JIN F F,et al. Tropical cyclones act to intensify El Niño[J]. Nature Communications,2019,10(1):1-13.

[29] 杨玉华,应明,陈葆德. 近 58 年来登陆中国热带气旋气候变化特征[J]. 气象学报,2009,67(5):689-696.

[30] 顾成林,康建成,闫国东,等. 1951—2015 年登陆中国热带气旋的时空变化特征及与 ENSO 的关系[J].灾害学,2018,33(4):129-134.

[31] 张春艳,刘昭华,王晓利,等. 20 世纪 50 年代以来登陆中国热带气旋的变化特征分析[J]. 海洋科学,2020,44(2):10-21.

[32] YING M,ZHANG W,YU H,et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2014,31(2):287-301.

[33] YU J,CHEN C,LI T,et al. Contribution of major SSTA modes to the climate variability of tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2016,142(6):1171-1181.

[34] TRENBERTH K E. The definition of El Niño[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,1997,78(12):2771-2778.

[35] TRENBERTH K E,STEPANIAK D P. Indices of El Niño evolution[J]. Journal of Climate,2001,14(8):1697-1701.

[36] BAMSTON A G,CHELLIAH M,GOLDENBERG S B. Documentation of a highly ENSO-related SST region in the equatorial Pacific:Research note[J]. Atmosphere-Ocean,1997,35(3):367-383.

[37] HUANG B,ANGEL W,BOYER T,et al. Evaluating SST analyses with independent ocean profile observations[J]. Journal of Climate,2018,31(13):5015-5030.

[38] HUANG B,THORNE P W,BANZON V F,et al. Extended reconstructed sea surface temperature,version 5 (ERSSTv5):upgrades,validations,and intercomparisons[J]. Journal of Climate,2017,30(20):8179-8205.

[39] CHENG L,ZHU J. Benefits of CMIP5 multimodel ensemble in reconstructing historical ocean subsurface temperature variations[J]. Journal of Climate,2016,29(15):5393-5416.

[40] BELL G D,HALPERT M S,SCHNELL R C,et al. Climate assessment for 1999[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2000,81(6):S1-S50.

[41] CHAN J C L. Interannual variations of intense typhoon activity[J]. Tellus A:Dynamic Meteorology and Oceanography,2007,59(4):455-460.

[42] 陆晓婕,董昌明,李刚. 1951-2015 年进入东海的台风频数及登陆点的变化[J]. 大气科学学报,2018,41(4):433-440.

[43] KLOTZBACH P J,CARON L P,BELL M M. A statistical/dynamical model for North Atlantic seasonal hurricane prediction[J]. Geophysical Research Letters,2020,47(20):1-9.

[44] CAMARGO S J,SOBEL A H. Western North Pacific tropical cyclone

intensity and ENSO[J]. Journal of Climate,2005,18(15):2996-3006.

[45] CHAN J C L. Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Niño and La Niña events[J]. Journal of Climate,2000,13(16):2960-2972.

[46] 曹智露,胡邦辉,杨修群,等. ENSO事件对西北太平洋热带气旋影响的分级研究[J]. 海洋学报(中文版),2013,35(2):21-34.

[47] 叶家成,杜新观,余锦华.影响中国大陆热带气旋路径分类及其特征研究[J].气象科学,2019,39(3):304-311.

[48] 赵秀兰. 近50年登陆我国热带气旋时空特征及对农业影响研究综述[J]. 海洋气象学报,2019,39(4):1-11.

[49] 李真真,吴立广,刘青元. 近20a影响我国台风活动变化趋势[J]. 气象科学,2016,36(6):752-759.

[50] 谈科,姜彤,王艳君,等. 1984—2019年影响中国东南沿海城市的热带气旋及其经济损失变化特征[J]. 海洋通报,2021,40(4):465-472.

[51] SHAN K,YU X. Interdecadal variability of tropical cyclone genesis frequency in western North Pacific and South Pacific ocean basins [J]. Environmental Research Letters,2020,15(6):064030.

[52] WANG S,TOUMI R. Recent migration of tropical cyclones toward coasts[J]. Science,2021,371(6):514-517.

[53] SUTTON R,MATHIEU P P. Response of the atmosphere-ocean mixed-layer system to anomalous ocean heat-flux convergence[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2002,128(5):1259-1275.

[54] KELLY K A. The relationship between oceanic heat transport and surface fluxes in the western North Pacific:1970-2000[J]. Journal of Climate,2004,17(3):573-588.

[55] 刘钦燕,周文. 西北太平洋台风数目与海洋热含量的年代际关系分析[J]. 热带海洋学报,2010,29(6):8-14.

[56] 蔡晓杰,姜华,王辉,等. 西北太平洋热带气旋与上层海洋热含量的关系[J]. 海洋学报(中文版),2013,35(3):28-35.

[57] 董玉杰,冯俊乔,胡敦欣. 西太平洋暖池热含量与南海夏季风强度的关系[J]. 海洋科学,2016,40(3):160-166.

(本文编辑:王少朋)