

龙霜, 董庆, 殷紫. 印度洋-太平洋暖池区中尺度涡特征研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(3): 118-127, doi:10.12284/hyxb2022003

Long Shuang, Dong Qing, Yin Zi. Statistical analysis of mesoscale eddies in the Indo-Pacific Warm Pool[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(3): 118-127, doi:10.12284/hyxb2022003

# 印度洋-太平洋暖池区中尺度涡特征研究

龙霜<sup>1,2</sup>, 董庆<sup>1\*</sup>, 殷紫<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 本文利用 1993 年 2 月至 2016 年 1 月共 23 年的中尺度涡数据, 对印度洋-太平洋暖池区 (即印-太暖池区, 15°S~15°N, 60°E~170°W) 中尺度涡的生命周期、振幅和半径等属性特征以及生命周期内各参数的演变特征进行了统计分析, 并研究了印-太暖池区中尺度涡生成个数的季节变化规律及与厄尔尼诺循环的关系。结果表明: 印-太暖池区大部分中尺度涡存在生命周期短、非线性、向西移动的特征; 气旋涡与反气旋涡各参数的统计特征及其在生命周期内的变化趋势较为相似; 印-太暖池区中尺度涡生成个数不具有明显的季节变化, 并且会受到厄尔尼诺-南方涛动事件的影响。

**关键词:** 印-太暖池; 中尺度涡; 参数分布与演变特征; 季节变化

中图分类号: P731

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)03-0118-10

## 1 引言

中尺度涡是海洋中典型的中尺度现象, 其空间尺度在数十到数百千米, 能存活数天到数月, 并且在运动过程中携带着大量能量, 约占海洋环流的 80%<sup>[1-2]</sup>。通过垂向混合及水平移动, 中尺度涡会对海域的温盐结构、流场分布和生态环境产生重要影响<sup>[3-7]</sup>, 因此, 自 20 世纪 70 年代以来中尺度涡一直是海洋学家们的研究热点。研究发现, 海面高度超过 50% 的变化是由振幅在 5~25 cm、直径在 100~200 km 的中尺度涡造成的<sup>[1]</sup>; 非线性中尺度涡的西传解释了由卫星观测到的海面高度向西传播的特征<sup>[1,6]</sup>, 并且非线性中尺度涡对海洋表层叶绿素 *a* 浓度的分布也有着重要影响<sup>[6-7]</sup>。

印度洋-太平洋暖池区 (印-太暖池区) 地处赤道区域, 包含热带西太平洋、东印度洋和东南亚众多边缘海, 是全球面积最大的暖池, 该区海-气耦合现象

异常显著, 能量交换频繁, 是影响全球气候的关键海域<sup>[8-10]</sup>。此外, 热带太平洋的南北赤道暖流将大量暖水运送到大洋西岸, 而堆积的暖水通过印尼贯穿流会进入到东印度洋进而影响印度洋的温盐分布, 在这一过程中, 中尺度涡携带水体运动就可能起着重要作用。因此, 研究印-太暖池区中尺度涡的变化规律对研究该海区物质运输和能量交换都具有重要意义。

## 2 数据与方法

### 2.1 中尺度涡

Liu 等<sup>[11]</sup> 基于闭合的海平面异常 (Sea Level Anomaly, SLA) 等高线对中尺度涡进行了识别, 通过分块并行处理的思路大大提高了运行效率。在数据预处理阶段使用高斯滤波器减弱了大尺度海洋信号, 高斯滤波器的纬向半径为 20°、经向半径为 10°。识别出来的中尺度涡满足以下条件: (1) 封闭等高线包含的种子点数目有且仅有 1 个; (2) 封闭等高线包裹的像

收稿日期: 2020-10-21; 修订日期: 2020-12-23。

基金项目: 国家自然科学基金 (41876210, 41801355); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA19060504)。

作者简介: 龙霜 (1995—), 女, 四川省绵阳市人, 主要从事海洋遥感研究。E-mail: longshuang18@mailsucas.ac.cn

\* 通信作者: 董庆, 研究员, 主要从事海洋过程遥感监测方法研究。E-mail: dongqing@aircas.ac.cn

素个数在 4~2 000 个;(3)形状边界测试时,形状误差 $\leq 55\%$ (形状误差=闭合等高线与拟合圆不重叠区域的面积/拟合圆的面积);(4)振幅 $\geq 0.25$  cm,振幅=|涡心 SLA 值-边界 SLA 值|。

在中尺度涡识别完成后对中尺度涡进行追踪,追踪算法由 Sun 等<sup>[12]</sup>提供,其原理如下:对  $t_1$  时刻识别出的中尺度涡,在以其质心为圆心、 $0.5^\circ$  为半径的圆内搜索  $t_2$  时刻的中尺度涡作为候选涡,如果有多个候选涡落在搜索范围内,则为每个候选涡计算出一个无量纲的相似参数以确定最接近  $t_1$  时刻的中尺度涡,迭代执行上述过程,直到检查了所有已识别的中尺度涡。

Tian 等<sup>[13]</sup>根据上述识别与追踪算法,利用 AVISO 提供的 TwoSat 和 AllSat 卫星高度计数据对全球海洋中尺度涡进行了识别与追踪,同时对两种类型的中尺度涡数据进行了对比分析,发现基于 AllSat 高度计数据识别的中尺度涡数据更适合对全球的中尺度涡进行研究,因此,本文采用 1993 年 2 月 1 日至 2016 年 1 月 31 日的 AllSat 中尺度涡数据。中尺度涡识别数据不仅提供了涡旋极性和位置等信息,还提供了中尺度涡有效边界、最大地转流边界、形状边界与最内层边界信息,包括各边界 SLA 值、边界振幅、边界包裹区域的平均涡动能、平均散度和平均相对涡度等,数

据的时间分辨率为 1 d,数据可从 <http://coadc.ouc.edu.cn/tfl/> 下载。

## 2.2 多变量厄尔尼诺-南方涛动指数

本文采用了描述厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)事件的多变量 ENSO 指数(MEI 指数),该指数通过海平面气压场、海表温度(Sea Surface Temperature, SST)、气温以及云覆盖率等多个变量经经验正交函数分解后获得<sup>[14]</sup>,能更全面地反映 ENSO 现象。该数据由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供,可从 <https://psl.noaa.gov/enso/mei/> 下载。

## 2.3 研究海域

暖池是指多年平均海表温度大于某一温度阈值的巨大暖水体,常用温度阈值有  $27.5^\circ\text{C}$ 、 $28^\circ\text{C}$  与  $28.5^\circ\text{C}$ 。本文采用  $28.5^\circ\text{C}$  作为暖池的指标,一方面该温度能够形成一个闭合的暖水域,另一方面它对热带对流有着重要影响<sup>[15-17]</sup>。受外界环境条件的影响,印-太暖池区的范围随着时间的变化而发生变化,为定量对印-太暖池区中尺度涡进行特征研究,本文对 NOAA 提供的最优插值高空间分辨率海表温度数据(NOAA\_OI\_SST\_V2)做平均处理,得到热带印度洋-西太平洋多年(1993 年 1 月至 2019 年 12 月)SST 大于  $28.5^\circ\text{C}$  的海域范围(图 1),并确定本文的研究海域为  $15^\circ\text{S}\sim 15^\circ\text{N}$ 、 $60^\circ\text{E}\sim 170^\circ\text{W}$ 。

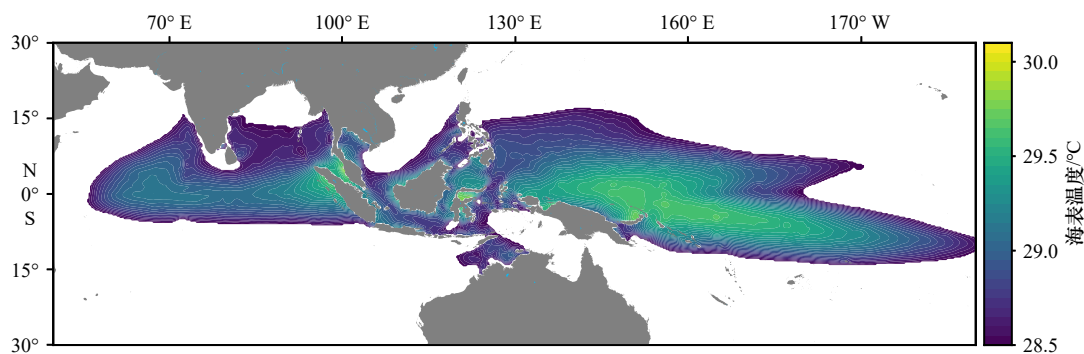


图 1 热带印度洋-西太平洋多年(1993 年 1 月至 2019 年 12 月)海表温度大于  $28.5^\circ\text{C}$  的海域

Fig. 1 The sea domain with sea surface temperature larger than  $28.5^\circ\text{C}$  in the tropical Indian Ocean-western Pacific Ocean from January 1993 to December 2019

## 3 结果分析

根据中尺度涡数据集,在 1993 年 2 月至 2016 年 1 月共 23 年间,印-太暖池区生命周期在 4 周及以上的中尺度涡共计 26 158 个,其中气旋涡 13 348 个,反气旋涡 12 810 个,表 1 给出了印-太暖池区中尺度涡基本特征参数的统计平均值。

### 3.1 属性特征

#### 3.1.1 生命周期

中尺度涡的生命周期是指中尺度涡从产生到消亡所经历的时间。印-太暖池区中尺度涡的平均寿命约为 6.40 周,气旋涡平均寿命(约 6.53 周)比反气旋涡平均寿命(约 6.27 周)略长。对印-太暖池区中尺度涡的生命周期进行统计分析,得到图 2,其中短周

表 1 印度洋-太平洋暖池区中尺度涡参数的统计平均值  
Table 1 Statistical mean values of mesoscale eddy parameters in the Indo-Pacific Warm Pool

参数	气旋涡	反气旋涡
生命周期/周	6.53	6.27
振幅/cm	2.86	2.42
半径/km	90.88	84.50
非线性	2.65	2.49
移动速度/(cm·s <sup>-1</sup> )	14.52	14.67
相对涡度/(10 <sup>-6</sup> s <sup>-1</sup> )	1.09	1.08
剪切变形率/(10 <sup>-8</sup> s <sup>-1</sup> )	-4.71	9.03
延伸变形率/(10 <sup>-8</sup> s <sup>-1</sup> )	6.78	-5.68
散度/(10 <sup>-8</sup> s <sup>-1</sup> )	1.43	-1.46

期为 4~8 周、中周期为 8~14 周,长周期大于 14 周,网格化到 1°×1°。根据图 2 可以得出以下结论:(1)气旋涡和反气旋涡生命周期的变化趋势基本一致,其个数都随着生命周期的增加呈指数下降;(2)印-太暖池区以短周期中尺度涡为主,约占涡旋总数的 78.8%,这些涡在印-太暖池区大部分海域都有生成,但是在 5°~15°N 和 10°~15°S 的海域最集中;(3)中周期中尺度涡约占总数的 18.1%,在 5°S~5°N 的海域几乎没有,大都分布在 5°~15°N 和 10°~15°S 的海域;(4)长周期中尺度涡数量较少,约占总数的 3.1%,主要分布在印度半岛的西侧、孟加拉湾和南海的南部、爪哇岛西侧、菲律宾群岛东侧 5°~15°N 以及新几内亚岛东南方向 5°~15°S 海域;(5)中长周期的气旋涡比反气旋涡占比更大,表明气旋涡更容易长时间存活。

### 3.1.2 振幅和半径

在本文中,中尺度涡的振幅是指涡心的 SLA 与边界 SLA 差值的绝对值,半径是指与中尺度涡面积相等的拟合圆的半径。图 3 给出了印-太暖池区中尺度涡半径与振幅的统计特征,其中图 3a 和图 3b 为气旋涡与反气旋涡振幅(0.5 cm 分段统计,即 0 代表中尺度涡振幅在 [0, 0.5) 之间,后同)频率分布直方图,图 3c 和图 3d 为半径(10 km 分段统计)的频率分布直方图,对各频率分布进行拟合,并对拟合曲线进行 K-S 检验。中尺度涡生成后受环境因素影响,其振幅与半径的大小可以看成是随机的,因此在大样本的前提下,通过统计得到的频率分布可近似作为概率分布。计算各拟合曲线的可决系数( $R^2$ ),气旋涡(反气旋涡)

振幅的  $R^2$  为 0.95(0.92),而半径的  $R^2$  为 0.97(0.96)。对拟合曲线进行 K-S 检验发现,中尺度涡的振幅服从 Burr(III 型)分布,而半径服从对数正态分布,且均呈现正偏态分布特征,即频率分布高峰偏左,并且气旋涡与反气旋涡的振幅(半径)变化趋势基本一致。约 95.7%(98.1%)的气旋涡(反气旋涡)振幅小于 8 cm,但是气旋涡(反气旋涡)振幅的极差约为 38.00 cm(18.80 cm);约 96.3%(99.7%)的气旋涡(反气旋涡)分布在 30~200 km 之间,但是气旋涡(反气旋涡)半径的极差约为 380.00 km(220.42 km),由此可见,印-太暖池区反气旋涡的参数分布比气旋涡更统一。图 3e 和图 3f 给出了气旋涡和反气旋涡振幅与半径的相关性分析。由于振幅和半径的单位尺度不同,先对振幅与半径做归一化处理,然后对变化趋势进行曲线拟合,气旋涡拟合曲线的  $R^2$  为 0.53,略高于反气旋涡(0.50)。由于拟合曲线是非线性的,本文采用 Spearman 相关系数  $r$  来描述二者间的相关性,相关系数均通过了显著性检验。结果表明,中尺度涡振幅与半径呈正相关关系,气旋涡振幅与半径的相关性(0.76)高于反气旋涡(0.65)。

### 3.1.3 非线性

Chelton 等<sup>[1]</sup>给出了描述中尺度涡非线性程度的 3 种方式,他们认为平流非线性参数是最具代表性的,因此本文采取平流非线性参数来描述中尺度涡的非线性程度。平流非线性参数被定义为中尺度涡的最大旋转速度与其移动速度的比值,当非线性参数的值  $\geq 1$  时,中尺度涡是非线性的,当非线性参数的值  $\geq 10$  时,中尺度涡是强非线性的<sup>[7]</sup>。中尺度涡的非线性程度越高,其封闭性越强,内部水团受外界海水的影响越少,越能保持其固有性质进行传输<sup>[8]</sup>。根据印-太暖池区中尺度涡非线性参数(0.5 分段统计)的频率分布(图 4)可以看出:(1)印-太暖池区非线性中尺度涡的个数随着非线性程度的增加呈现指数下降,气旋涡与反气旋涡的变化趋势基本一致;(2)印-太暖池区非线性中尺度涡居多,非线性气旋涡(反气旋涡)占总数的 87.0%(85.9%),但是强非线性中尺度涡较少,强非线性气旋涡(反气旋涡)仅占总数的 1.7%(1.2%)。

### 3.1.4 运动学参数

图 5 给出了印-太暖池区中尺度涡的运动学参数的分布特征。气旋涡(反气旋涡)在北半球的相对涡度为正(负)值,在南半球为负(正)值。结合图 5 和

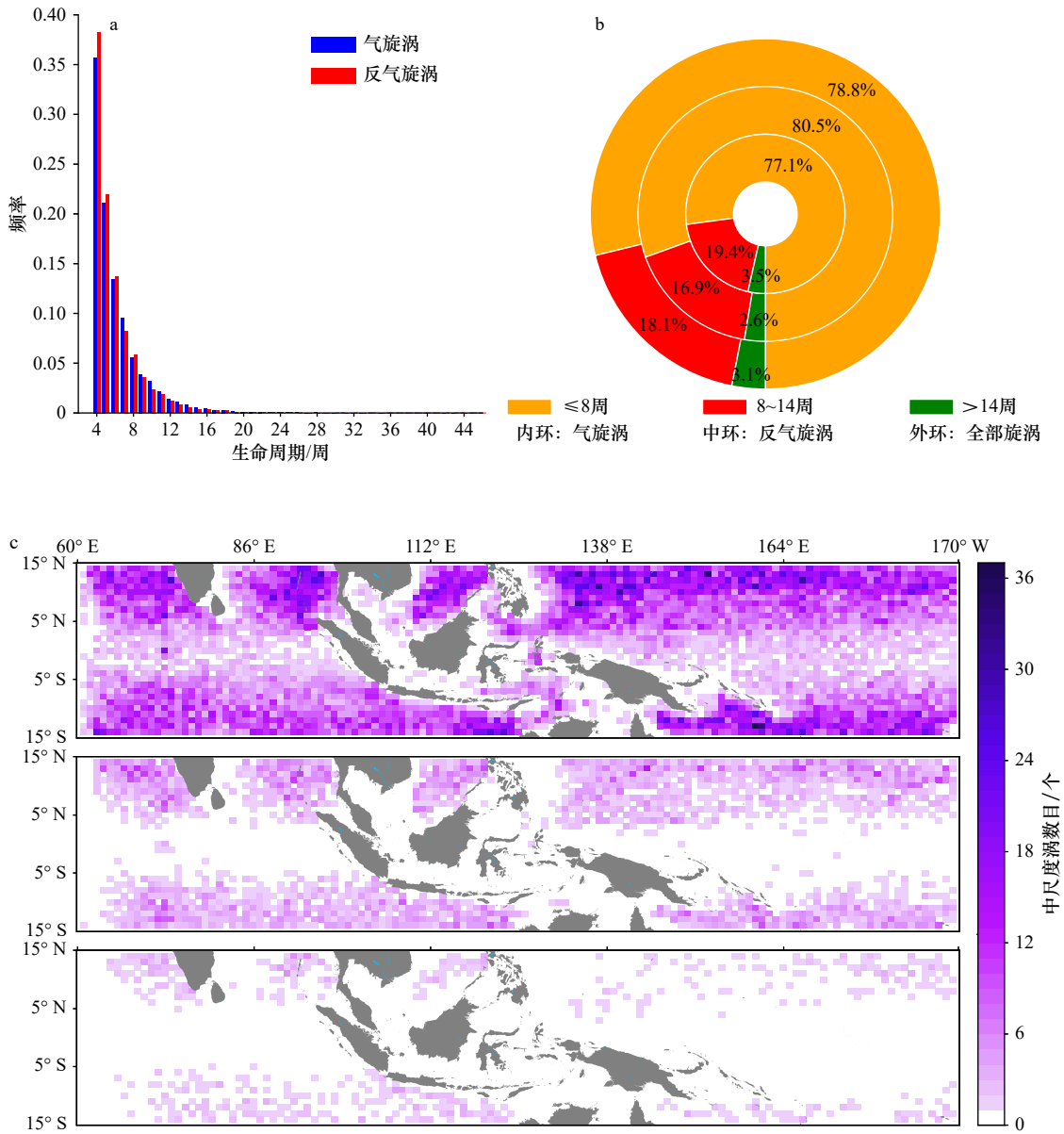


图2 印度洋-太平洋暖池区中尺度涡生命周期分布特征

Fig. 2 Statistical characteristics of mesoscale eddy lifetime in the Indo-Pacific Warm Pool

a. 生命周期频率分布; b. 短周期、中周期和长周期涡旋百分比; c. 短周期、中周期和长周期中尺度涡生成个数的空间分布

(从上到下: 短周期、中周期、长周期)

a. Frequency distribution of mesoscale eddy lifetime; b. percentage of mesoscale eddies with short, medium and long lifetime; c. spatial distribution of mesoscale eddies with short, medium and long lifetime (from top to bottom: short lifetime, medium lifetime and long lifetime)

表1可以知道,北半球中尺度涡的生成频率更高、平均相对涡度更大;无论南半球还是北半球,气旋涡相对涡度的平均值均大于反气旋涡,表明气旋涡拥有更强的剪切。K-S检测发现印-太暖池区中尺度涡的剪切变形率、延伸变形率和散度均服从*t*分布,表明这3个参数呈现轴对称分布,根据图5可以发现这3个参数集中分布在 $-2.5 \times 10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 之间(散度 $-2.5 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ )。当剪切变形率为正值时,表明中尺度涡在东北-西南方向延伸,在西北-东南方向

压缩;当延伸变形率为正值时,表明中尺度涡在东西方向上延伸,在南北方向上压缩。结合表1与图5可以发现,气旋涡与反气旋涡在运动过程中并不是规则的圆形结构,但变形的幅度也不是很大。中尺度涡的平均散度值都很小,表明其在运动过程中较为稳定,水体丢失较少。

### 3.1.5 移动特征

中尺度涡的移动速度是其在整个生命期间移动距离与时间的比值。图6分别给出了印-太暖池区中

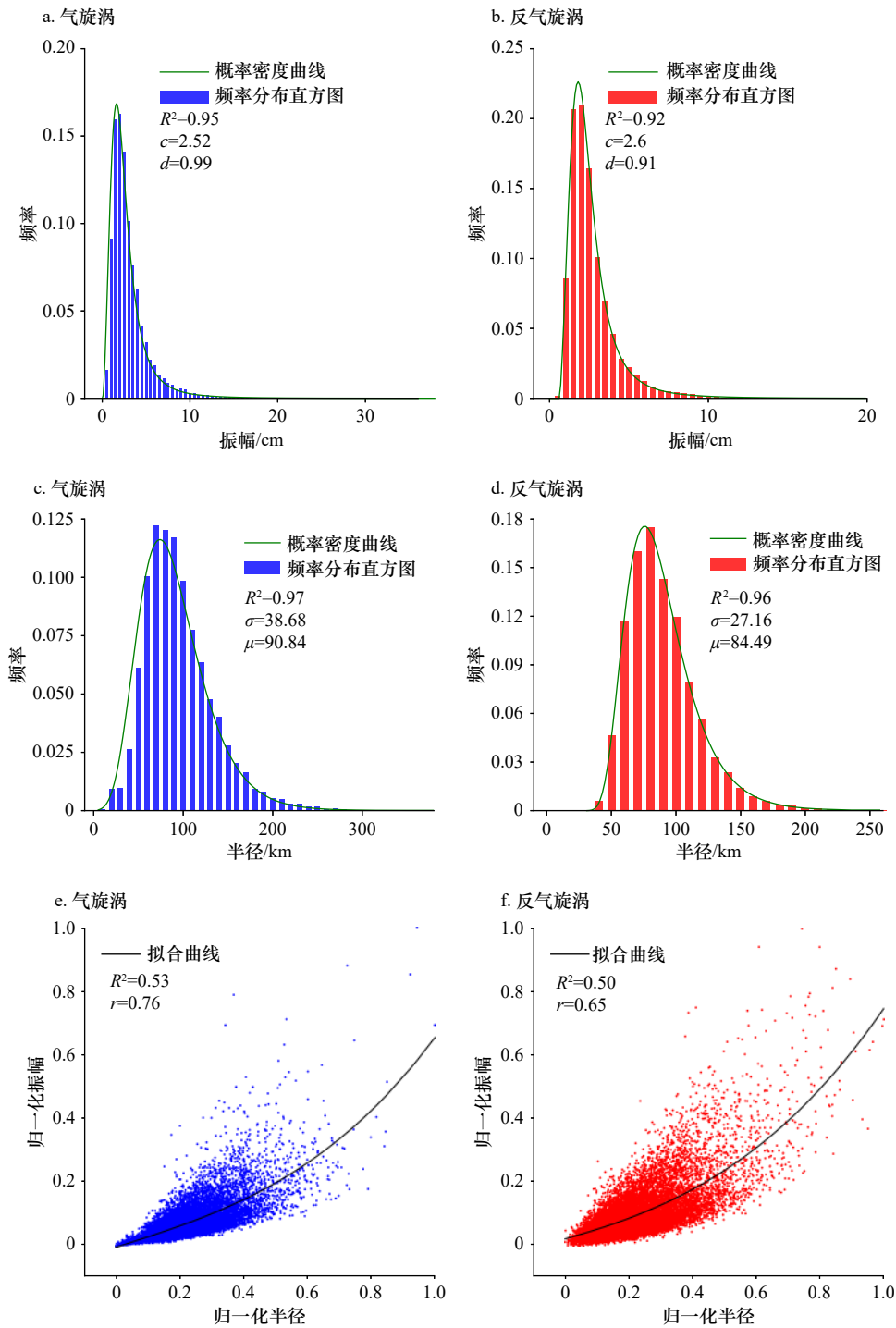


图3 印度洋-太平洋暖池区中尺度涡振幅与半径分布特征

Fig. 3 Statistical characteristics of amplitude and radius of mesoscale eddy in the Indo-Pacific Warm Pool

尺度涡移动速度(1 cm/s 分段统计)的频率分布图和同起点的轨迹图,其中规定东向的移动速度为正值,中尺度涡轨迹向北偏移和向东偏移为正值。结合图6有以下结论:(1)印-太暖池区约94.4%(94.9%)的气旋涡(反气旋涡)向西移动,西向移动的平均速度为14.98 cm/s(15.16 cm/s)且集中分布在10~26 cm/s之间,东向移动的平均速度为13.98 cm/s(13.88 cm/s)且

集中分布在4~18 cm/s之间,这表明西向移动的中尺度涡速度更大;(2)气旋涡(反气旋涡)西向移动的平均距离约为573.77 km(555.95 km)且集中分在200~900 km,东向移动的平均距离429.23 km(442.32 km)且集中分布在300~500 km,西向移动距离超过1000 km的气旋涡(反气旋涡)约占7.1%(5.6%),而东向仅占0.05%(0.04%),这表明中尺度涡西向的移动

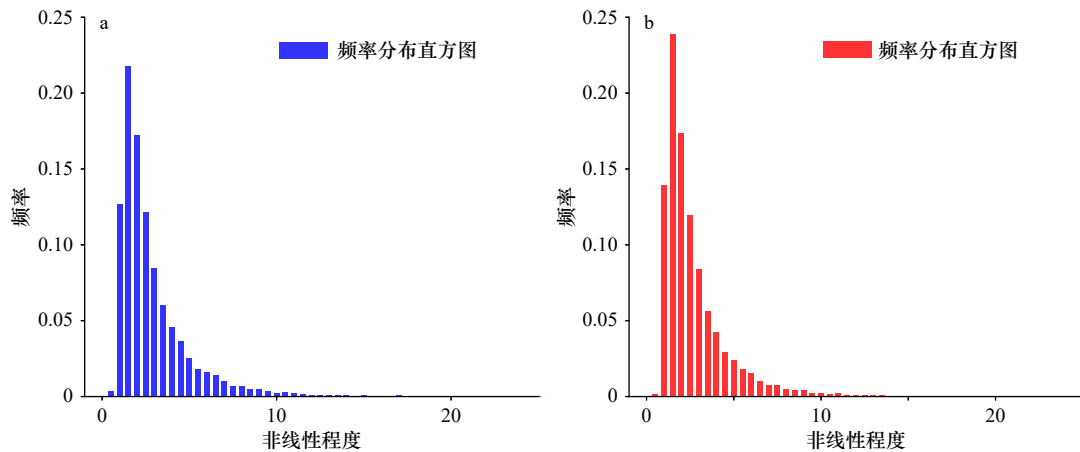


图4 印度洋-太平洋暖池区气旋涡(a)和反气旋涡(b)非线性程度频率分布

Fig. 4 Frequency distribution of nonlinearity of cyclones (a) and anticyclones (b) in the Indo-Pacific Warm Pool

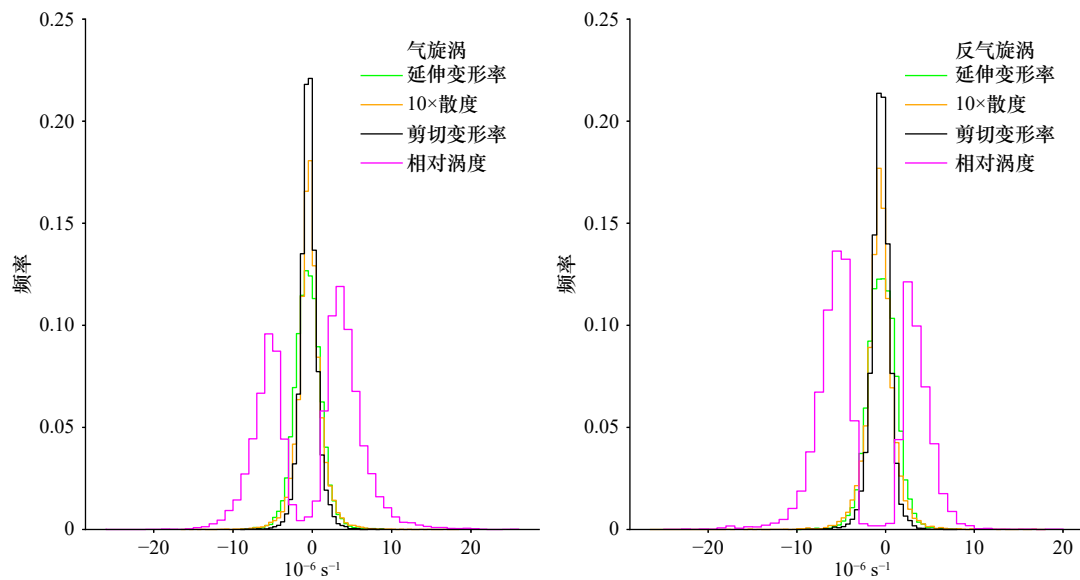


图5 印度洋-太平洋暖池区中尺度涡运动学参数分布特征

Fig. 5 Statistical characteristics of mesoscale eddy kinematic parameters in the Indo-Pacific Warm Pool

距离比东向移动距离更长。此外,气旋涡与反气旋涡都存在向极传播的特征,这与 Chelton 等<sup>[1]</sup>和 Tian 等<sup>[13]</sup>的研究结论一致。

### 3.2 生命周期内参数的演变特征

对中尺度涡生命周期进行归一化,对各时刻(时间步长为 0.05)的参数进行合成平均,以便研究印-太暖池区中尺度涡各参数在生命周期内的演变特征,结果如图 7 所示。结合图 7 可以得出以下结论:(1)总体来说,中尺度涡的振幅、半径、移动速度和非线性程度在生命周期内的变化比较明显,而中尺度涡的运动学参数变化相对较小,并且气旋涡与反气旋涡的大部分参数变化趋势比较一致;(2)中尺度涡振幅与半

径在生命周期内的变化趋势具有一定的对称性,在中尺度涡产生初期(0~0.2)振幅(半径)呈增加趋势,在发展成熟期(0.2~0.8)振幅(半径)保持基本不变,在衰减期(0.8~1.0)振幅(半径)呈下降趋势,大部分时间内气旋涡的平均振幅(平均半径)都比反气旋涡大;(3)中尺度涡的平均移动速度在成熟期都比较稳定,但是在生成初与消失前移动速度达到最大值,造成这种现象的具体原因尚不明确;(4)相较于其他参数,中尺度涡的非线性程度在涡旋发展成熟期波动较大,但是亦能保持相对稳定,并且气旋涡的非线性程度略强于反气旋涡,这表明气旋涡更能保持稳定形态进行传输,这也是气旋涡更容易存活的原因之一;(5)无论是

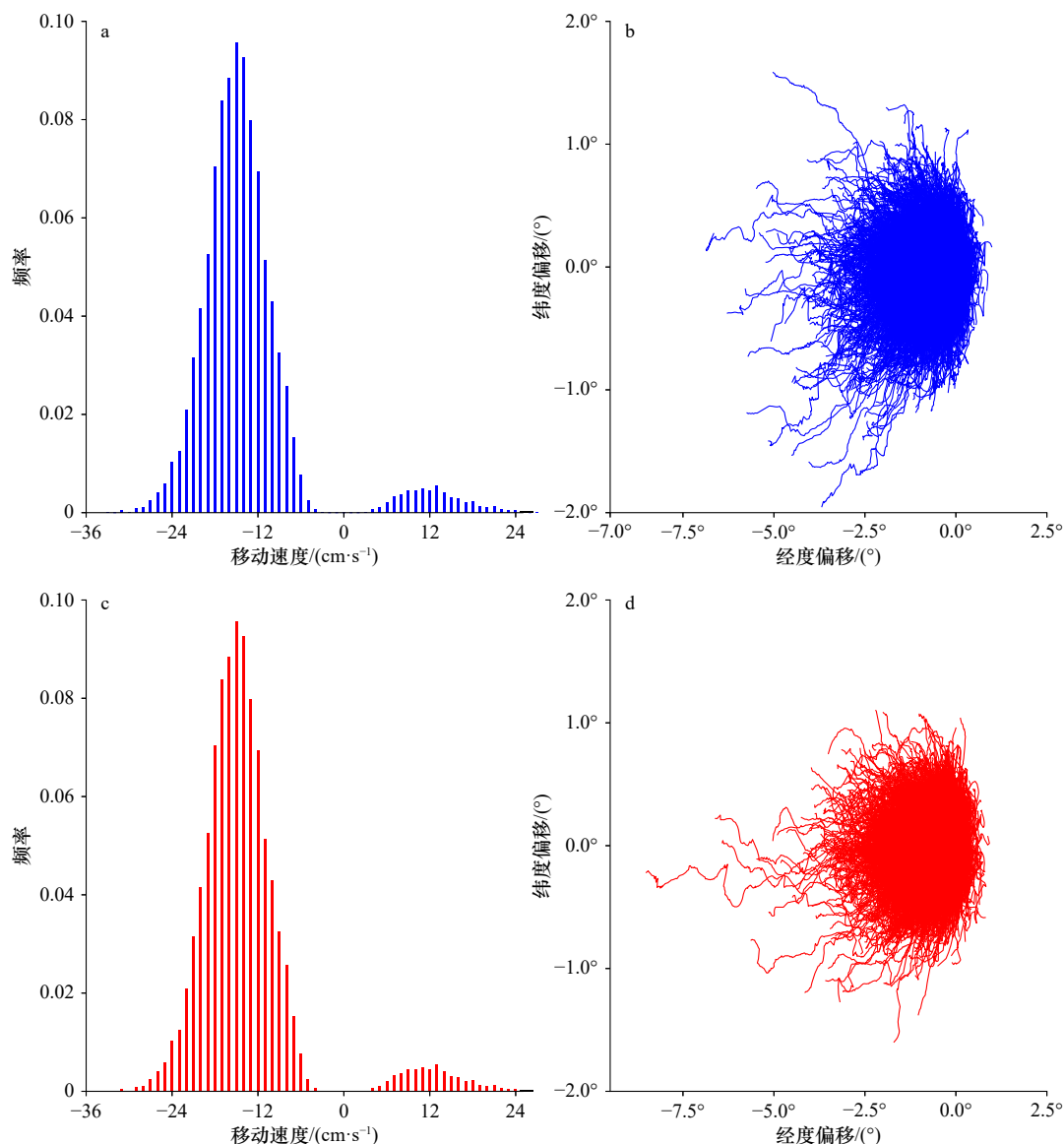


图6 印度洋-太平洋暖池区中尺度涡移动速度(a, c)和移动距离(b, d)分布特征

Fig. 6 Statistical characteristics of propagation speed (a, c) and trajectories (b, d) of mesoscale eddy in the Indo-Pacific Warm Pool

a. 气旋涡移动速度频率分布; b. 气旋涡同起点轨迹图; c. 反气旋涡移动速度频率分布; d. 反气旋涡同起点轨迹图

a. Frequency distribution of propagation speed of cyclones; b. trajectories of the same starting point of cyclones; c. frequency distribution of propagation speed of anticyclones; d. trajectories of the same starting point of anticyclones

在南半球还是在北半球, 气旋涡和反气旋涡的相对涡度、剪切变形率、延伸变形率和散度的变化都非常小;(6)北半球(南半球)的气旋涡延伸变形率几乎为0, 但是剪切变形率却在 $-0.69 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  ( $0.85 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )附近, 表明气旋涡倾向于在西北-东南(东北-西南)方向延伸而在东北-西南(西北-东南)方向压缩, 但反气旋涡与气旋涡相反(北半球:  $0.71 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , 南半球:  $-0.78 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )。

### 3.3 季节变化规律

为了解印-太暖池区中尺度涡的季节变化规律,

对中尺度涡的生成个数按月份进行统计, 结果如图8a所示。总体来说, 印-太暖池区产生的中尺度涡的季节差异较小, 其中1月生成个数最少约85.57个, 12月最多约99.17个。气旋涡平均每月生成48.2个, 最大值出现在9月(约52.70个), 最小值出现在5月(约43.91个), 夏季(若无特别说明, 本文中季节均指北半球)气旋涡生成个数相对较少, 占总数的24.3%, 其余季节较为平均。反气旋涡平均每月生成46.27个, 最大值出现在12月(约49.48个), 最小值出现在1月(约40.74个), 秋季生成个数最少, 占总数的

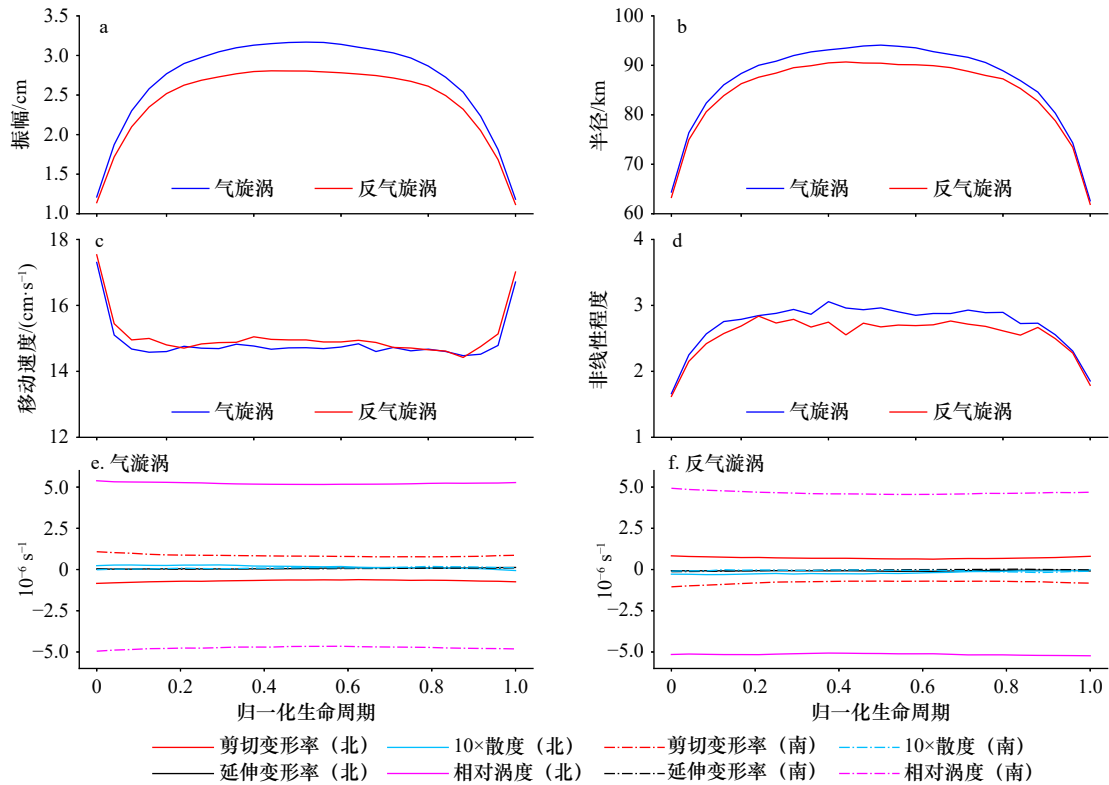


图7 印度洋-太平洋暖池区中尺度涡参数在生命周期内的演变特征

Fig. 7 Evolution characteristics of mesoscale eddy parameters over lifecycle in the Indo-Pacific Warm Pool

24.0%, 夏季最多, 占总数的 25.9%, 春冬两季较为接近, 占比分别为 25.4% 和 24.7%。

图 8b 给出了印-太暖池区中尺度涡生成数量空间分布的季节变化。可以发现, 印-太暖池中尺度涡大都产生于  $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$  和  $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{S}$  之间的海域。中尺度涡的生成个数在孟加拉湾南部春夏两季偏少, 在新几内亚岛东南方向  $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{S}$  的海域春冬两季偏少, 在其余海域的季节差异并不明显。

### 3.4 与 ENSO 现象的关系

ENSO 是热带太平洋典型的海-气耦合现象, 众多研究表明 ENSO 对印-太暖池区的海洋环境有着重要影响<sup>[9-10]</sup>, 为探讨印-太暖池区中尺度涡生成个数与 ENSO 之间的关系, 将 ENSO 暖相位(厄尔尼诺事件)和 ENSO 冷相位(拉尼娜事件)期间各月中尺度涡生成个数的异常值与对应的 MEI 指数分别进行合成, 得到图 9。可以看出, 在厄尔尼诺事件期间, 印-太暖池区气旋涡个数大致呈现先增加后减少的趋势, 与 MEI 指数变化曲线大致呈正相关, 反气旋涡个数波动较大且变化规律不是特别明显; 在拉尼娜事件期间, 印-太暖池区气旋涡个数略微呈现增加趋势, 与 MEI 指数大致呈负相关, 反气旋涡的个数变化呈现一

个“W”形状, 即在拉尼娜事件初期及成熟期后期个数减少, 在拉尼娜事件成熟期前期和末期个数增加, 与 MEI 指数大致呈正相关。

## 4 总结

本文基于 1993 年 2 月至 2016 年 1 月的中尺度涡识别数据与轨迹数据, 对印-太暖池区中尺度涡的参数分布特征、生命周期内参数的演变特征以及时空规律进行了统计分析。主要结论如下:

(1) 印-太暖池区气旋涡和反气旋涡参数(生命周期、振幅、半径、非线性和运动学参数)的频率分布特征基本一致, 但反气旋涡的参数分布更为集中。

(2) 气旋涡和反气旋涡各参数在其生命周期内的演变情况基本一致, 但是气旋涡参数的数值略大于反气旋涡。

(3) 总体来说, 印-太暖池区中尺度涡生成个数的季节差异比较小, 并且大都集中在  $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$  和  $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{S}$  之间的海域。

(4) 受 ENSO 现象影响, 印-太暖池区中尺度涡的生成个数都呈现一定的增加趋势, ENSO 暖(冷)相位期间气旋涡(反气旋涡)受影响程度更明显。

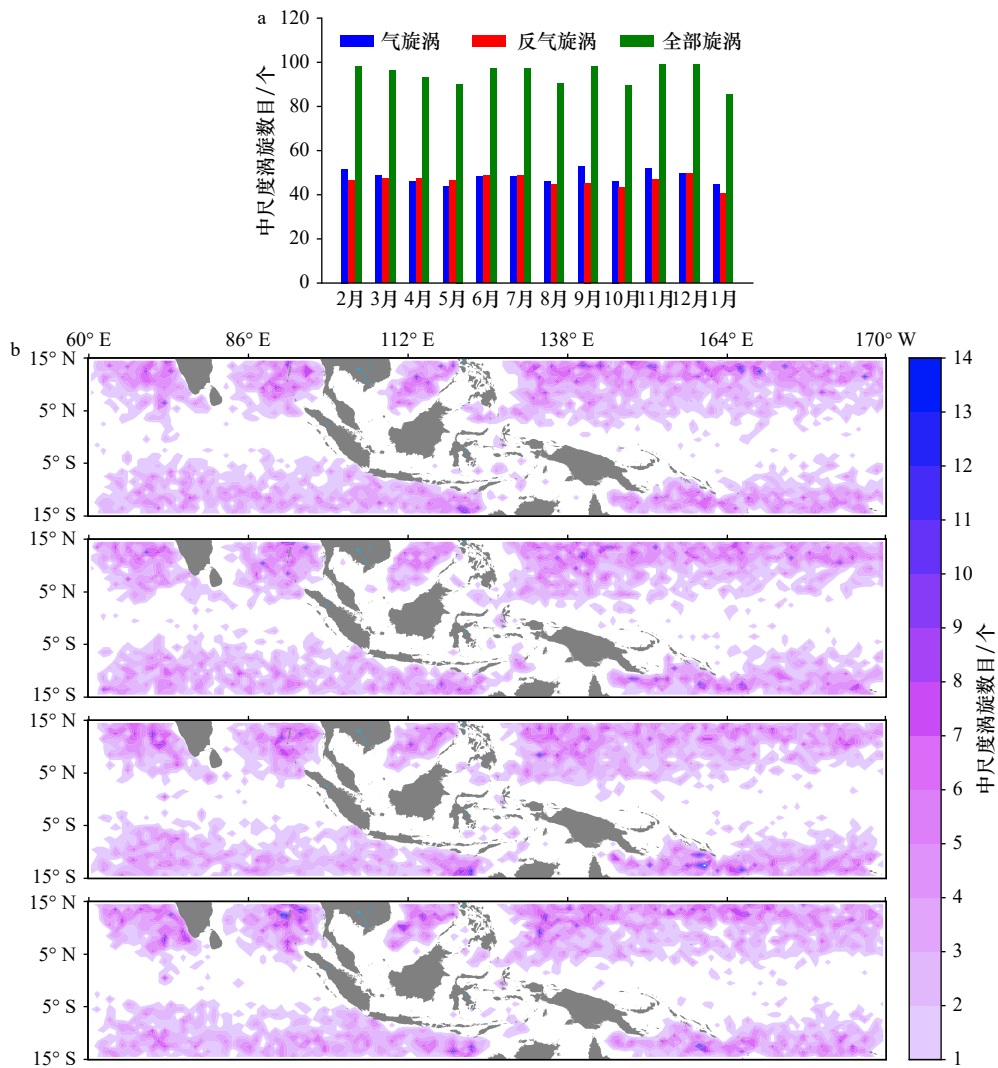


图 8 印度洋-太平洋暖池区中尺度涡生成个数季节变化

Fig. 8 Seasonal variation of mesoscale eddy in the Indo-Pacific Warm Pool

a. 中尺度涡逐月生成数量; b. 中尺度涡生成数量空间分布的季节变化(从上到下依次为春、夏、秋、冬)

a. Monthly number of mesoscale eddies; b. seasonal spatial distribution of mesoscale eddies (from top to bottom: spring, summer, autumn and winter)

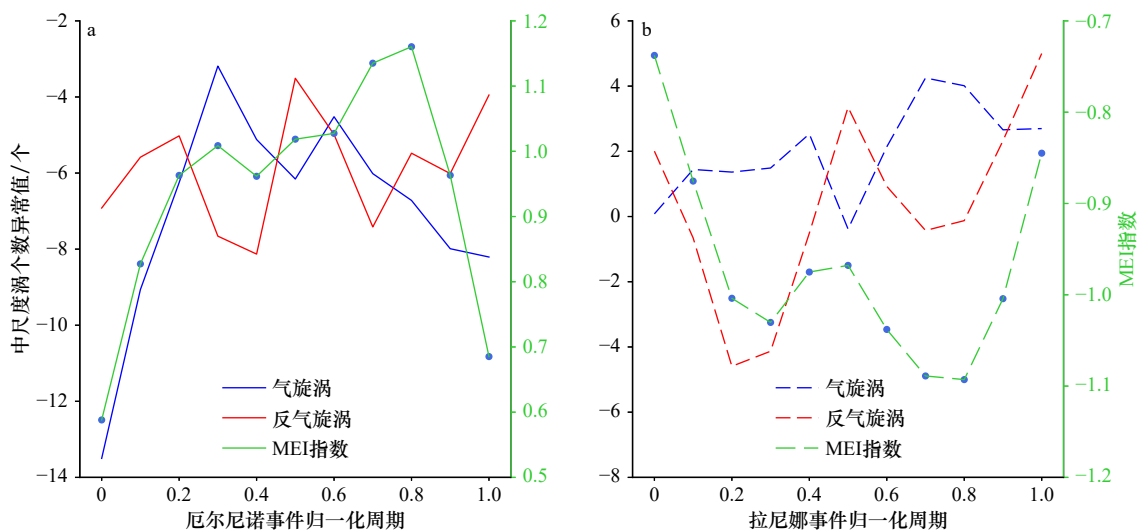


图 9 印度洋-太平洋暖池区中尺度涡生成个数异常值在厄尔尼诺(a)及拉尼娜(b)事件中的变化

Fig. 9 Variation of anomaly number of mesoscale eddy in the Indo-Pacific Warm Pool during El Niño (a) and La Niña (b)

## 参考文献:

- [1] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167–216.
- [2] Le Traon P Y, Morrow R. Chapter 3 ocean currents and eddies[J]. *International Geophysics*, 2001, 69: 171–215.
- [3] Yim B Y, Noh Y, Qiu B, et al. The vertical structure of eddy heat transport simulated by an eddy-resolving OGCM[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(2): 340–353.
- [4] Early J J, Samelson R M, Chelton D B. The evolution and propagation of quasigeostrophic ocean eddies[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(8): 1535–1555.
- [5] Adams D K, McGillicuddy Jr D J, Zamudio L, et al. Surface-generated mesoscale eddies transport deep-sea products from hydrothermal vents[J]. *Science*, 2011, 332(6029): 580–583.
- [6] Chelton D B, Gaube P, Schlax M G, et al. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 328–332.
- [7] 刘汾汾. 南海中尺度涡生态效应的遥感研究[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2013.  
Liu Fenfen. A remote sensing study of biological responses to mesoscale eddies in the South China Sea[D]. Guangzhou: South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [8] 邱东晓, 黄菲, 杨宇星. 东印度洋-西太平洋暖池的年代际变化特征研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2007, 37(4): 525–532.  
Qiu Dongxiao, Huang Fei, Yang Yuxing. Interdecadal variability of the Indo-Pacific warm pool[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(4): 525–532.
- [9] 邱云, 李燕初, 李立, 等. 印度洋-太平洋暖池海域表层水温分析[J]. *台湾海峡*, 2010, 29(4): 547–554.  
Qiu Yun, Li Yanchu, Li Li, et al. Analysis of sea surface temperature in the Indo-Pacific warm pool[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2010, 29(4): 547–554.
- [10] 李晓惠, 徐峰, 陈虹颖, 等. 1980–2016年西太平洋暖池与ENSO循环过程的相关分析[J]. *海洋气象学报*, 2017, 37(3): 85–94.  
Li Xiaohui, Xu Feng, Chen Hongying, et al. Correlation analysis of the cycle process between the western Pacific warm pool and ENSO during 1980–2016[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2017, 37(3): 85–94.
- [11] Liu Yingjie, Chen Ge, Sun Miao, et al. A parallel SLA-based algorithm for global mesoscale eddy identification[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, 33(12): 2743–2754.
- [12] Sun Miao, Tian Fenglin, Liu Yingjie, et al. An improved automatic algorithm for global eddy tracking using satellite altimeter data[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 206.
- [13] Tian Fenglin, Wu Di, Yuan Liming, et al. Impacts of the efficiencies of identification and tracking algorithms on the statistical properties of global mesoscale eddies using merged altimeter data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(8): 2835–2860.
- [14] Wolter K, Timlin M S. Measuring the strength of ENSO events: How does 1997/98 rank?[J]. *Weather*, 1998, 53(9): 315–324.
- [15] Graham N E, Barnett T P. Sea surface temperature, surface wind divergence, and convection over tropical oceans[J]. *Science*, 1987, 238(4827): 657–659.
- [16] Webster P J, Lukas R. TOGA COARE: The coupled ocean-atmosphere response experiment[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1992, 73(9): 1377–1416.
- [17] Wang Chunzai, Enfield D B. The tropical western hemisphere warm pool[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(8): 1635–1638.

## Statistical analysis of mesoscale eddies in the Indo-Pacific Warm Pool

Long Shuang<sup>1,2</sup>, Dong Qing<sup>1</sup>, Yin Zi<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on mesoscale eddy dataset from February 1993 to January 2016, the distribution characteristics and evolution processes of mesoscale eddies in the Indo-Pacific Warm Pool (15° S~15° N, 60° E~170° W), and its seasonal variation and relationship with ENSO are statistically analyzed in this paper. It shows that most mesoscale eddies in the Indo-Pacific Warm Pool are short-lived and nonlinear, and propagate westward. The study also finds that the distribution characteristics of cyclonic eddies and anticyclone eddies are similar, and so do their variation trends over the eddy lifecycle. The seasonal numbers of mesoscale eddies vary insignificantly in the whole domain and are affected by ENSO in the meanwhile.

**Key words:** Indo-Pacific Warm Pool; mesoscale eddy; distribution characteristics and evolution processes of parameters; seasonal variation