

文章编号: 1674-5566(2026)01-0305-19

DOI: 10.12024/jso.20250304812

西北太平洋中尺度涡上的海气参数异常特征分析

龙逢鑫, 高郭平, 苗侨龙, 卞思进

(上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306)

摘要: 海洋中尺度涡在物质输运、能量交换和气候变率调节等方面有至关重要的作用。为了理解西北太平洋海域活跃的中尺度涡过程, 认识该海域中尺度涡对其上部海气参数的影响。本文基于卫星高度计和散射计资料, 利用涡旋识别追踪和复合分析方法, 对2006—2009年西北太平洋30 000+中尺度暖涡和冷涡上的海气参数异常特征进行研究。结果表明, 暖涡(冷涡)上分别存在正(负)海温、海表风速、感热通量和潜热通量异常, 正(负)异常极值分别为 $1.64(-1.58)^\circ\text{C}$ 、 $0.72(-0.58)\text{m/s}$ 、 $19.60(-39.25)\text{W/m}^2$ 和 $40.98(-55.03)\text{W/m}^2$; 暖涡(冷涡)引起的海表风速、感热通量和潜热通量异常与海温异常存在显著的线性耦合, 最大线性耦合系数分别为 $0.49(0.50)\text{m/(s}\cdot\text{C)}$ 、 $19.57(20.04)\text{W/(m}^2\cdot\text{C)}$ 和 $33.61(32.96)\text{W/(m}^2\cdot\text{C)}$; 暖涡(冷涡)上的海气参数异常及耦合特征存在区域性和季节性差异, 主要受背景海温梯度和风速影响, 通过调制垂向热输运效率, 改变海表面粗糙度进而影响海气参数的异常。此外, Ekman抽吸、混合层调节及边界层稳定性等多个过程协同作用也是可能的影响机制, 未来需通过高精度区域耦合模型量化各种影响机制的相对贡献。本研究可为中尺度涡海气耦合以及中尺度涡影响下的海气参数预报提供科学依据和参考。

关键词: 中尺度涡; 海气耦合; 复合分析; 西北太平洋

中图分类号: P 732.6 **文献标志码:** A

全球海洋中普遍存在的中尺度涡, 空间尺度从几十到几百公里, 时间尺度从几天到几百天, 其蕴含的巨大动能约占全球海洋环流总动能的80%^[1]。中尺度涡通过自身旋转和海洋运动, 影响区域内的温度、盐度、热量和叶绿素等要素, 在全球海洋物理和生物化学性质的传输和调节中发挥重要作用^[1-2]。同时, 中尺度涡与海洋上部大气的相互作用影响海气边界层的热通量异常, 进而影响局部天气和全球气候变化^[3-4]。此外, 中尺度涡对水下通信、海上航运和经济渔场等也有重要影响。因此开展中尺度涡及海气耦合特征的研究具有重要意义。

从20世纪70年代以来, 国内外众多学者对西北太平洋的中尺度涡进行了大量研究, 早期主要基于现场实测资料进行个例分析^[5]。随着海洋卫星的发射, 高精度的遥感资料显著提升了中尺度涡的识别与追踪效率, 同时推动了其特征分析

的系统化和全面化。林宏阳等^[6]利用法国空间局卫星海洋学数据存档、验证与解释中心(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic, AVISO)提供的卫星高度计融合数据, 对南海及西北太平洋17年间的中尺度涡活动规律进行了统计分析。其他学者也基于各种卫星数据和涡旋识别方法, 对西北太平洋的涡旋特征、季节变化、区域差异等进行了深入的分析和比较^[7-10]。同时, 一些学者也开始关注中尺度涡引起的动力和热力强迫, 以及大气对中尺度涡的响应。1984年, BBUSINGER等^[11]首次利用1978年联合海气相互作用项目数据, 将海洋中尺度涡与海温强迫关联起来, 并发现暖涡可以增加湍流热通量, 进而抬升大气边界层。后续多项研究^[12-15]表明, 暖涡会削弱大气边界层的稳定性, 增强动量传输和垂直混合, 导致中高层大气动量下传, 增大海表风速, 最终增强潜热和感热

收稿日期: 2025-03-27 修回日期: 2025-06-01

基金项目: 中国科学院泛三极先导项目“极端天气下的海浪模拟及安全分析”(D-8005-23-1118)

作者简介: 龙逢鑫(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为中尺度涡海气耦合。E-mail: clinglfx@163.com

通信作者: 高郭平, E-mail: gpgao@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydxxb.com>

通量;而冷涡则表现出与之相反的特性。近年来,众多学者对西北太平洋中尺度涡大气响应开展了诸多研究。MA 等^[16]采用海表温度(Sea surface temperature, SST)数据、卫星观测数据和再分析数据,对黑潮延伸体的中尺度涡进行了合成研究,所得结果与之前的研究类似。此外,研究还发现了中尺度涡对大气的强迫能够穿透边界层到达自由大气。CAI 等^[17]也利用高分辨率天气预报模式研究春季北太平洋中尺度涡对气候的影响,结果表明,整个太平洋的中尺度涡表现为减弱上层风暴路径,加强低层风暴活动。SUN 等^[18]基于卫星测高和再分析数据,研究了北太平洋副热带逆流区大气对海洋中尺度涡响应的季节变化及其机制。研究表明,海温梯度强度的变化引起了中尺度涡海气耦合的季节变化。

综上所述,众多学者对西北太平洋中尺度涡的统计特征及大气响应已有较多认识,但大多数研究关注的是较大范围的统计平均或典型区域中尺度涡上大气的响应特征,对整个西北太平洋及典型区域中尺度涡的特征分析及中尺度涡上的海气参数异常的对比研究仍比较缺乏。为此,本研究将利用AVISO发布的卫星高度计数据,利用最新的涡旋识别和追踪算法,对2004—2023年西北太平洋及其2个主要的涡动能高值区的中尺度涡进行识别、追踪和统计分析,揭示涡旋生成的规律、年际变化、空间分布。同时,结合多种卫星散射计数据,对2006—2009年30 000+的中尺度暖涡和冷涡上的海气参数异常特征进行分析,为进一步开展西北太平洋中尺度涡的海气相互作用研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究使用的涡旋识别数据为哥白尼海洋环境监测服务中心的全球多元卫星高度数据集,由AVISO (<http://www.aviso.altimetry.fr/>)分发,AVISO卫星高度计数据融合了多个卫星数据,具有更高的可靠性和精度,能够更好地捕捉到海洋中尺度涡。时间分辨率为1 d,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,本研究采用2004年1月至2023年12月的绝对动力地形(Absolute dynamic topography, ADT)、海表面高度异常(Sea level anomaly, SLA)和地转流等数据资料。

SST数据采用美国国家海洋和大气管理局国家气候数据中心开发的最佳插值海面温度(Optimal interpolation sea surface temperature, OISST)数据集。OISST产品融合了先进的超高分辨率辐射计的红外卫星观测和现场测量数据^[19],提供了 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 网格上的逐日海温数据,具有良好的精度,时间跨度从1981年至今。

海表面风速采用遥感系统提供的快速散射计(Quick scatterometer, QuikScat)10 m高度风场数据^[20]。QuikScat卫星由美国宇航局于1999年发射,专门用于海表风场的观测,能够揭示世界各地较短空间尺度上的风场结构特征^[21-22]。该资料时长从1999年7月至2009年11月,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为1 d。

海表热通量资料选用日本遥感海洋通量数据集(Japanese ocean flux data sets with use of remote sensing observations, J-OFURO)的第三版,J-OFURO是日本东海大学海洋科学与技术学院利用卫星资料建立的海洋表面通量数据集,提供了净热通量、感热通量、潜热通量等数据资料,该资料时长从2002年1月至2013年12月,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为1 d。

综合涡旋数据集与各数据的有效时间,考虑涡旋识别数据前两年可能存在的不稳定性,选用2006—2009年时间段逐日资料开展研究。

1.2 研究方法

本研究使用的涡旋检测方法是py-eddy-tracker(PET)算法,涡旋识别程序基于ADT,在PET算法中,采用ADT作为背景场,利用半功率截止波长为700 km的一阶 Lanczos 滤波器对ADT进行平滑处理,再从原始ADT场中减去平滑结果,得到一个包含中尺度变化的网格数据^[23]。经研究,该算法对比早期的涡旋识别算法,在南极绕极流、黑潮、湾流等非均匀平均动力地形中具有更好的检测效率^[24]。具体检测方法:(1)基于一阶 Lanczos 低通滤波器(截止波长700 km)对ADT进行空间平滑,分离行星尺度背景场。通过原始场与滤波场的差分运算,构建中尺度信号的高通滤波网格场,抑制大尺度运动对涡旋特征的干扰;(2)在 $[-100, 100]$ cm范围内以0.2 cm间隔扫描闭合等值线,采用形态动力学联合判据,闭合等值线需满足几何形状误差率低于70%、振幅 ≥ 0.4 cm、单连通区域无数据缺失、单

极值约束(极大/极小值分别对应反气旋涡/气旋涡),且包围像素数为5~1 000。通过极值方向一致性验证(气旋涡内像素高度值均低于等值线,反气旋涡反之),排除伪涡旋信号;(3)基于最大流速闭合等值线构建最优拟合圆,以非线性最小二乘法确定其几何中心为涡旋中心,计算拟合圆半径作为特征尺度参数,表征涡旋主控动能区的空间范围。

涡旋追踪采用重叠法^[24-25],重叠率(R_0)计算方法如下:

$$R_0 = \frac{A_t \cap A_{t+dt}}{A_t \cup A_{t+dt}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_t 为 t 时刻的涡旋面积。当 $R_0 > 5\%$ 时,保留预选涡旋,在多个预选涡旋的情况下,保留重叠率较大的涡旋,当下一时刻没有 $R_0 > 5\%$ 的涡旋时,则判定该涡旋消亡,预选涡旋作为一个新涡旋。对于受检测程序施加的限制或受局地变化而消失几天后再出现的涡旋,可以在跟踪过程中设置1~4个允许缺失的连续观测结果,并利用插值法对缺失的涡旋进行重构。采用该方法处理逐日涡旋的背景场,能够减少算法的计算量,降低对涡旋特征值处理的不确定性^[24]。本研究将允许缺少结果设为3 d。

通过涡旋的追踪,得到了包含半径、振幅、跟踪时间、经纬度、日期以及最大旋转速度等变量的数据集,其中,最大旋转速度 U_g 为涡旋内沿着所有封闭的海面高度等值线的平均地转速度的最大值,反映了涡旋内外海面的高度差即振幅的相对大小,可以指示涡旋能量总体情况^[26],本研究的涡动能(Eddy kinetic energy, EKE)计算公式参考了ZHANG等^[27]的定义,计算方法如下:

$$EKE = \frac{U_g^2}{2} \quad (2)$$

式中: U_g 为最大旋转速度。

滑动平均是进行趋势拟合中的一个基础方法,相当于低通滤波,为了保留物理量在空间上的中小尺度特征,参考以往学者研究^[16, 28-29],本文将各项参数去除纬向8°滑动平均后的值定义为异常值,各项参数的异常求取公式如下:

$$X_{(i,j)\text{abnormal}} = X_{(i,j)} - \overline{X_{(i,j)\text{zonal_average}}} \quad (3)$$

式中: $X_{(i,j)\text{abnormal}}$ 为某参数异常值; $X_{(i,j)}$ 为数据值;

$\overline{X_{(i,j)\text{zonal_average}}}$ 为该数据值纬向8°平均值。

在求取异常值之后,将所有确定的中尺度涡内部的各参数异常值的空间分布组合在一起。对于每一个已识别的中尺度涡,各大气海洋要素的异常值被插值到一个统一的高分辨率网格上,并通过涡中心到涡边缘的径向距离进行归一化,用该网格空间范围来表示每个方向上中尺度涡半径 R 的2倍距离的异常场。

随后参照李英等^[30]提出的热带气旋合成方法,对中尺度涡进行样本合成分析,合成公式如下:

$$\overline{S(x, y, t)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(x, y, t) \quad (4)$$

式中: $S_i(x, y, t)$ 为 t 时刻第 i 个中尺度涡变量 S 的空间场; $\overline{S(x, y, t)}$ 为该变量的空间样本均值; (x, y) 为某时刻涡旋中心半径 R 的2倍距离范围内的坐标。该方法能够灵活选取任意涡旋中心周围区域,对所有复合涡旋求取变量 $S(x, y)$ 的样本平均值,即可获得中尺度涡对应的各项海气参数的涡致异常合成结果。这种缩放使得数千个中尺度涡的异常平均为一个单一的复合图,从而描述它们在表面变量上的平均特征。

研究^[31-33]发现,在全球海洋中约有五分之一的异常涡旋,常规的反气旋涡(气旋涡)被认为与暖(冷)核有关,能够引起正(负)的海温异常,异常涡旋则与之相反。本研究根据涡旋的极性及其半径范围内的海温异常极值来区分常规涡旋和异常涡旋^[34]。若反气旋涡(气旋涡)半径内的海温异常极值为正(负),则定义为常规暖涡(冷涡),反之为异常暖涡(冷涡)。根据涡旋极性和涡旋半径内的海温异常极值2个条件可分离4种类型的中尺度涡。由于复合数据的分辨率较低,同时为了体现涡致异常的显著性,参考SUN等^[35]的研究,筛选涡旋振幅大于1 cm,有效半径在25~155 km范围内,且涡旋半径内海温异常极值大于1 °C的常规暖涡(以下简称暖涡)和小于-1 °C的常规冷涡(以下简称冷涡)进行复合。在研究区域内每天符合条件的涡旋被视为1个独立涡旋,累计对西北太平洋30 000+的暖涡和冷涡进行复合分析。

2 结果

2.1 涡旋统计特征分析

2.1.1 涡旋统计结果

为探究研究区内中尺度涡的生成和发展特征,本研究对西北太平洋(Western North Pacific, WNP)开阔海域(不包含日本海与鄂霍茨克海)寿命在4周以上(包含4周)的中尺度涡进行统计分析,其中还包括两个典型的涡动能高值区:一个是黑潮延伸区(Kuroshio extension, KE),一个是副热带逆流区(Subtropical countercurrent, STCC),其研究区划分见图1,3个区域的具体地理范围信息见表1。

本研究采用的中尺度涡数量统计方法有2种:拉格朗日法和欧拉法。拉格朗日法将中尺度涡在整个生命周期中的轨迹视作一个整体,即同一中尺度涡指的是从生成到消亡的整个过程。欧拉法则是对某个时刻所有的中尺度涡进行统计,每个时刻识别到的中尺度涡视为一个独立个体。根据中尺度涡数据集统计,在2004—2023年间,WNP区域通过拉格朗日法统计的反气旋涡有

9 206个,气旋涡有9 912个。通过欧拉法统计的反气旋涡有638 598个,气旋涡有630 373个。

对3个区域的中尺度涡生成数量、振幅、半径、涡动能和寿命等参数进行比较(表2)。由表可知,3个区域的气旋涡生成数量都多于反气旋涡。涡旋在振幅、半径和寿命方面存在明显差异,KE区域的平均振幅最大,STCC区域最小,且KE区域的平均振幅约是STCC区域的2倍以上。关于半径,3个区域的反气旋涡平均半径均大于气旋涡,STCC区域的反气旋涡具有最大的平均半径。在寿命方面,3个区域的中尺度涡平均寿命为8~9周,反气旋涡的寿命比气旋涡长。

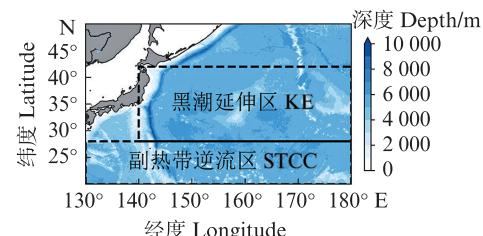


图1 黑潮延伸区和副热带逆流区的区域划分

Fig. 1 Regional division of the Kuroshio Extension Zone and Subtropical Countercurrent Zone

表1 西北太平洋及两个涡动能高值区的地理范围分布

Tab. 1 Geographic range distribution of the Northwest Pacific and two areas of high eddy kinetic energy

研究区域 Research area	纬度 Latitude	经度 Longitude
西北太平洋 WNP	20°N~50°N	130°E~180°E
黑潮延伸区 KE	28°N~42°N	140°E~180°E
副热带逆流区 STCC	20°N~28°N	130°E~180°E

表2 不同区域涡旋特征参数的统计比较

Tab. 2 Statistical comparison of eddy characteristic parameters in different regions

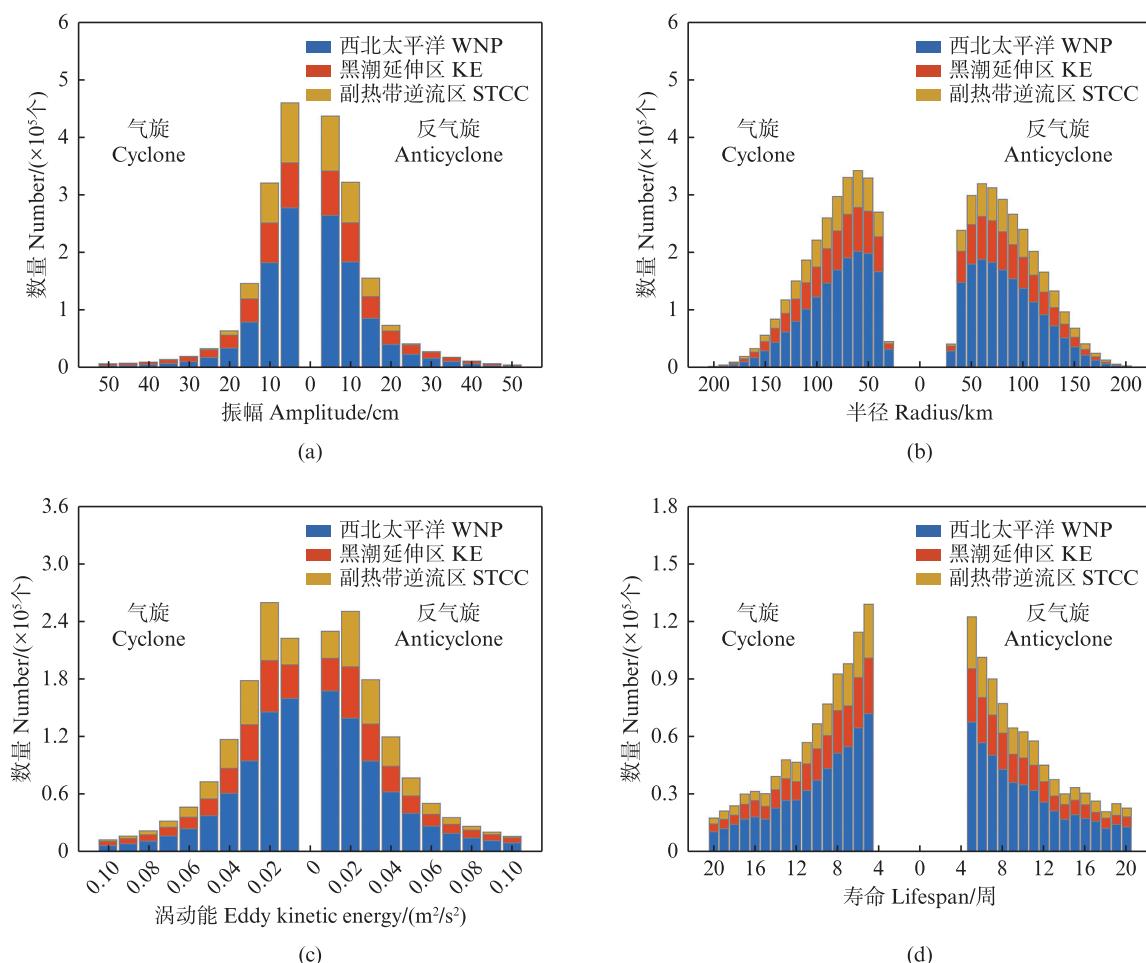
研究区 Research area	参数 Parameters	反气旋涡(AEs) Anticyclonic eddies		气旋涡(CEs) Cyclonic eddies	
		生成数 Number generated/个	9 206	9 912	气旋涡(CEs) Cyclonic eddies
西北太平洋 WNP	振幅 Amplitude/cm	9.09(9.04)	9.20(11.22)	75.60(32.21)	0.05(0.10)
	半径 Radius/km	79.01(33.24)	79.98(33.79)	8.88(6.56)	9.64(8.47)
	涡动能 Eddy kinetic energy/(m ² /s ²)	0.04(0.05)	0.06(0.07)	0.08(0.14)	0.03(0.02)
	寿命 Lifespan/周	3 780	9.28(7.54)	8.88(6.02)	4 022
	生成数 Number generated/个	12.28(11.35)	84.75(34.11)	79.64(31.80)	3 205
黑潮延伸区 KE	振幅 Amplitude/cm	81.09(33.74)	8.61(5.90)	6.18(4.46)	6.61(4.59)
	半径 Radius/km	0.06(0.07)	0.03(0.02)	0.03(0.02)	0.03(0.02)
	涡动能 Eddy kinetic energy/(m ² /s ²)	9.28(7.54)	8.88(6.02)	8.09(4.75)	8.09(4.75)
	寿命 Lifespan/周	3 435	3 435	3 435	3 435
	生成数 Number generated/个	79.98(33.79)	79.64(31.80)	79.64(31.80)	79.64(31.80)
副热带逆流区 STCC	振幅 Amplitude/cm	0.05(0.10)	0.08(0.14)	0.08(0.14)	0.05(0.10)
	半径 Radius/km	8.88(6.56)	8.88(6.02)	8.88(6.02)	8.88(6.02)
	涡动能 Eddy kinetic energy/(m ² /s ²)	8.88(6.02)	8.88(6.02)	8.88(6.02)	8.88(6.02)
	寿命 Lifespan/周	8.09(4.75)	8.09(4.75)	8.09(4.75)	8.09(4.75)
	生成数 Number generated/个	6.18(4.46)	6.18(4.46)	6.18(4.46)	6.18(4.46)

注:平均值(标准差)显示在括号外(括号内)。

Notes: Mean values (standard deviation) shown outside (inside) the parentheses.

图2展示了中尺度涡数据集中各特征参数区间范围内的涡旋分布情况。如图所示,气旋涡和反气旋涡的数量在各特征参数区间内呈对称分布趋势。从振幅来看,3个区域内大多数涡旋振幅在15 cm以下,且涡旋数量随振幅的增大而递减,振幅主要集中在1~10 cm,峰值振幅在1~5 cm。从半径来看,WNP区域的统计结果呈偏态分布,半径主要集中在30~80 km,峰值半径出现在50~60 km。在KE和STCC区域,峰值半径在40~80 km范围内各子区间涡旋数量分布相对均衡。从涡动能来看,WNP区域与KE区域、STCC

区域存在差异。WNP区域的峰值涡动能在0.01 m^2/s^2 及以下,且涡旋数随涡动能增加而递减;KE和STCC区域的涡旋数随涡动能先增后减,峰值涡动能在0.01~0.02 m^2/s^2 。整体上,大多数涡旋集中在0.06 m^2/s^2 以下。从寿命来看,大多数涡旋的寿命集中在4~12周,峰值寿命为4~5周。在3个区域中,涡旋数并未严格随着涡旋寿命的增加而减少。值得注意的是,气旋涡数在15~16周较之前有所增加,反气旋涡数在14~15周和18~19周较之前也呈增长趋势。



图中左列为气旋涡,右列为反气旋涡。

The left column in the figure shows cyclonic eddies, and the right column shows anticyclonic eddies.

图2 西北太平洋及两个涡动能高值区的涡旋振幅、半径、涡动能和寿命分布

Fig. 2 Distribution of eddy amplitude, radius, eddy kinetic energy, and lifetime for the Northwestern Pacific and two regions of high eddy kinetic energy

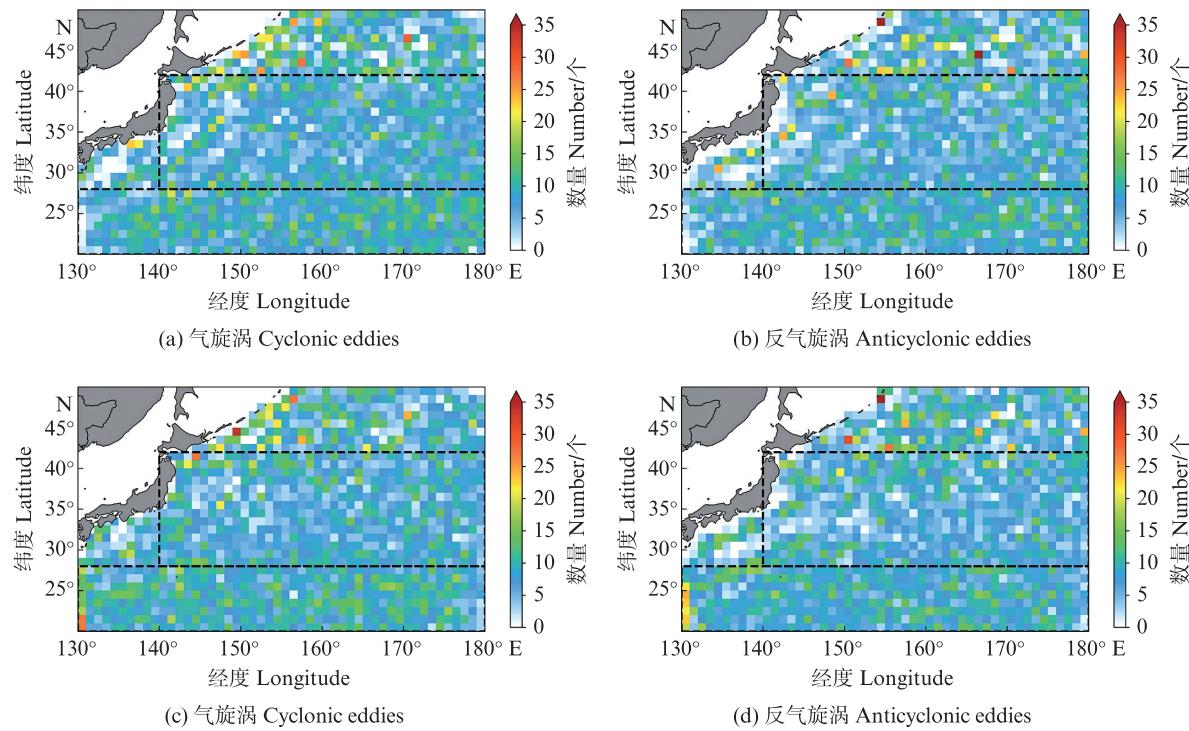
2.1.2 涡旋空间分布特征

参考CHEN等^[36]的网格划分方法,对WNP区域 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格内涡旋的生成和消亡情况进行统计(图3)。在这里,我们将每个涡旋轨迹的第一

次和最后一次观测时间定义为涡旋的生成和消亡时刻。如图所示,西北太平洋中尺度涡生成地主要集中在KE区域的北部、STCC区域的东部和千岛群岛边缘海域。KE区域的涡旋的高生成量

主要与黑潮路径南北蜿蜒的强剪切流有关, STCC区域可能主要受副热带逆流的垂直剪切作用, 千岛群岛边缘的涡旋可能与地形和边界流有关。涡旋消亡数的分布格局与生成数类似, 涡旋生成数较多的位置同时也是消亡数较多的位置,

如KE北部和千岛群岛边缘, 此外, 涡旋消亡的位置大多数位于西北太平洋的西边界和西北部沿岸区域, 如日本东部和千岛群岛东部的陆坡陆架区, 这可能与大多数涡旋西移, 并且受到了沿岸较弱的环流和陆地的阻挡的作用有关。



a、b为涡旋产生数; c、d为涡旋消亡数。

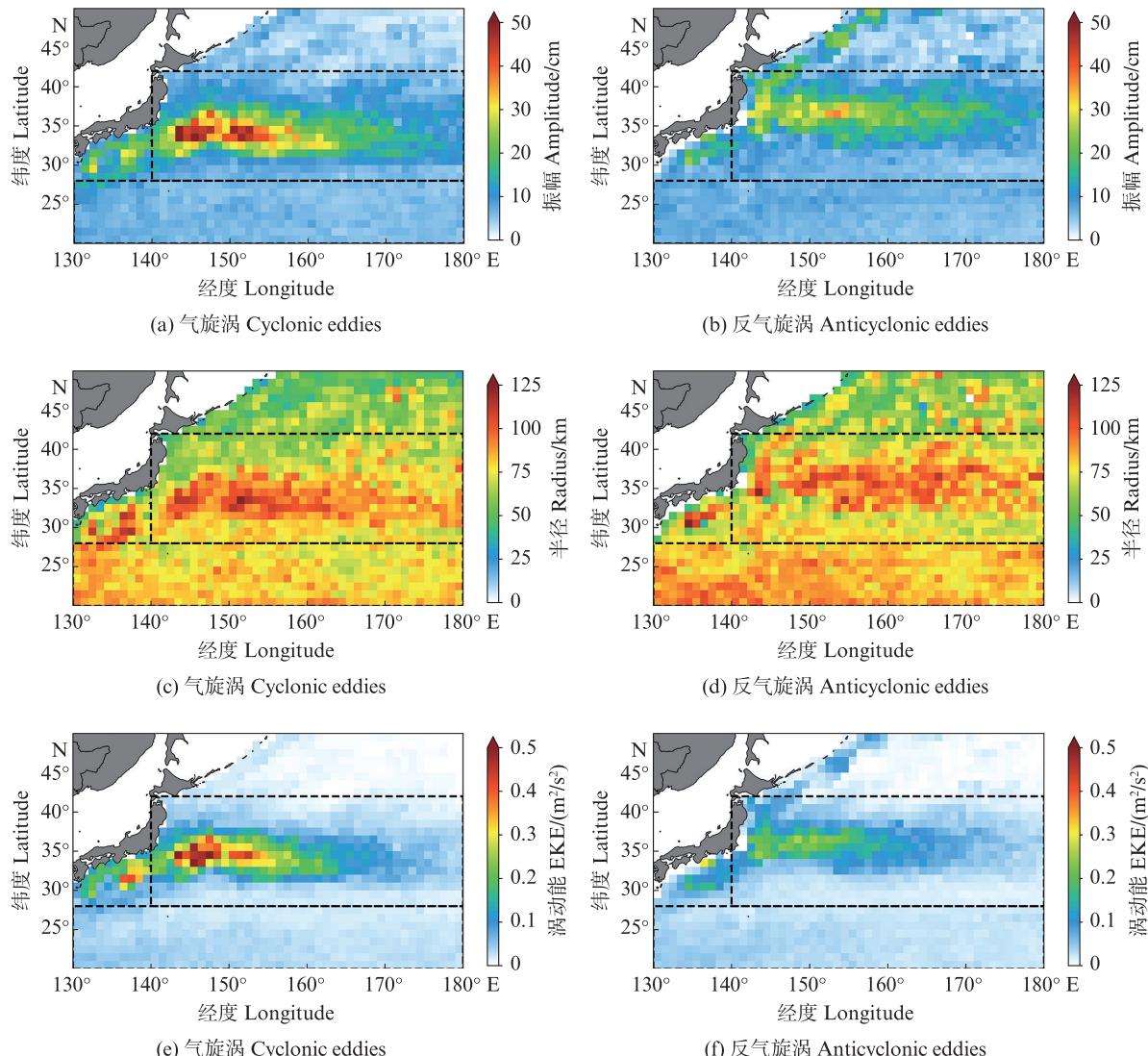
a and b are eddy generation numbers; c and d are eddy extinction numbers.

图3 气旋涡和反气旋涡的生成数和消亡数在 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 网格内的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the generation and extinction numbers of the cyclonic eddies and anticyclonic eddies on a $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ grid

与上述研究方法相似, 分别对涡旋的振幅、半径和涡动能3个参数进行统计, 求取每个 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 网格内涡旋的平均特征参数(图4)。如图所示, 西北太平洋中尺度涡平均振幅为5~10 cm, 气旋涡大值区主要在KE区域西部, 反气旋涡主要在KE区域北部和沿岸陆坡区, 最大平均振幅分别约为50 cm和35 cm。平均半径为50~100 km, 气旋涡和反气旋涡的平均半径最大值都约为130 km, 气旋涡大值区主要分布在KE区域的中南部, 反气旋涡大值区除KE区域中北部外, 在STCC区域也有较大的平均半径。平均涡动能的分布趋势与振幅类似, 在KE区域具有最大的平均涡动能, 气旋涡最大值约为 $0.6 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 反气旋最大值约为 $0.3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。KE区域的涡旋较其他区域

具有更大的振幅、半径和涡动能, STCC区域具有更多的半径较大的反气旋涡。KE区域西部气旋涡较大的振幅、涡动能可能是受黑潮的高流速梯度产生的正压不稳定作用, 而KE北部的反气旋涡则受到黑潮与亲潮锋面的相互作用, 其较小半径受混合层深度季节变化所调制。相比之下, STCC区域的反气旋涡受副热带高压动力背景控制: 高压东侧的东北风应力旋度通过Ekman抽吸诱导表层辐合, 促进反气旋涡生成发展, 但夏季强层结抑制了垂向能量串级, 导致涡动能降低。因此, 西北太平洋中尺度涡振幅、半径及涡动能的空间分布特征与区域环流背景存在显著动力耦合。



a、b 为振幅; c、d 为半径; e、f 为涡动能。

a and b are amplitudes; c and d are radius; e and f are eddy kinetic energy.

图4 气旋涡和反气旋涡的振幅、半径、涡动能在 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 网格内的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of amplitude, radius, and eddy kinetic energy of the cyclonic eddies and anticyclonic eddies on a $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ grid

2.1.3 涡旋运移轨迹特征

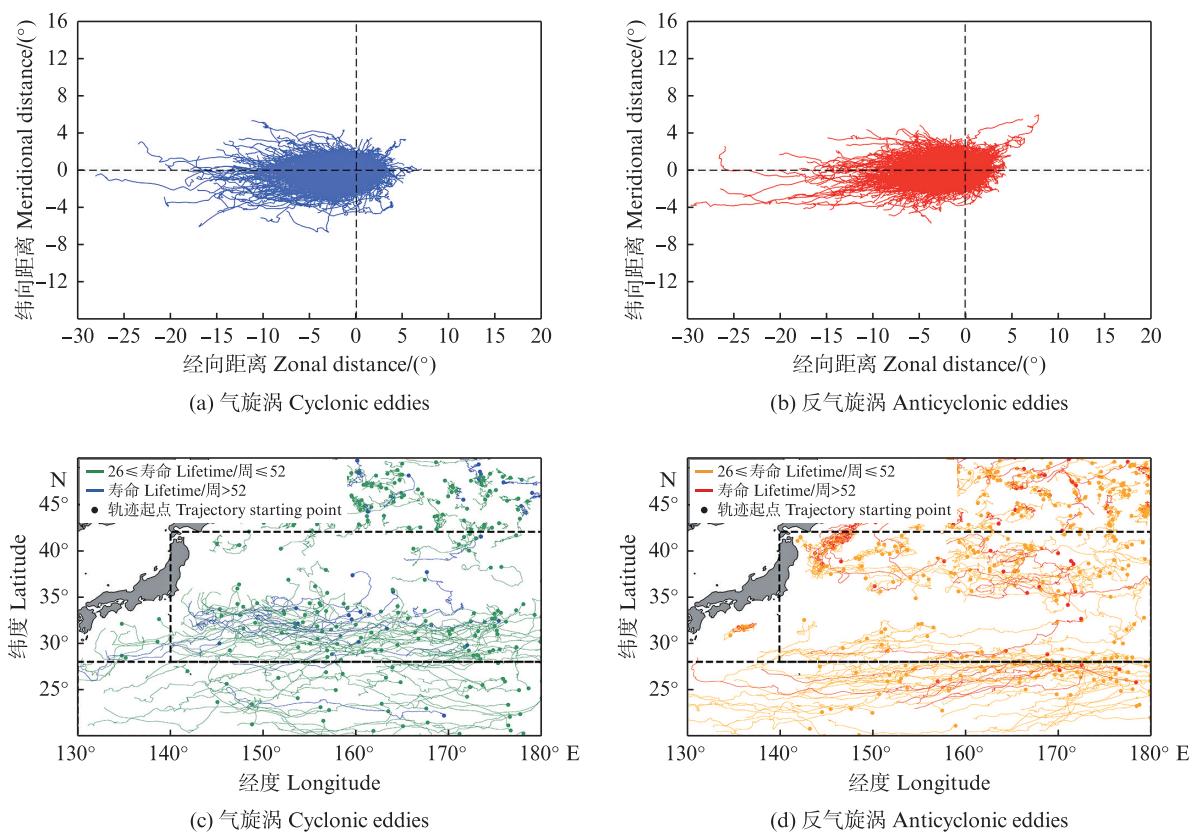
为了直观地观察西北太平洋中尺度涡的运动方向,我们将所有中尺度涡的消亡位置与其生成位置进行作差,得到所有气旋涡和反气旋涡的初始地理位置在同一起点(0° E, 0° N)的轨迹合成功图(图5a和图5b)。如图所示,西北太平洋大多数中尺度涡有显著西移的运动特征,其成因与平均流场和 β 效应有关^[1]。西移涡旋中,气旋涡和反气旋涡西移的最大距离约 30° 经度。尽管大多数涡旋向西运动,仍有少量涡旋呈现东移趋势,但其移动距离较西移的涡旋有明显减小。此外,径直向北或向南移动的涡旋较少,大多是在西向运

动中产生向北或向南的偏移。其中,长轨迹涡旋中向西南方向移动的涡旋占比最高。值得注意的是,气旋涡中南移的趋势较北移更为显著,反气旋涡中则是南移和北移的趋势相当。

中尺度涡在运动过程中可输送海水,进而调控物质、能量及动量等传输。涡旋传播的速度和方向主要受平均流控制,但复杂的海气相互作用会对其运动产生影响^[37]。研究^[38]表明,长寿命中尺度涡的海洋动能最为集中,能够传播更远的距离,因此其物质传输和能量交换过程也更加密切。为深入了解西北太平洋中尺度涡的移动轨迹特征,我们分别对生命周期大于等于26周且小

于等于52周、大于52周的中尺度涡轨迹进行了分析(图5c和图5d)。如图所示,寿命在26周到52周的涡旋中,气旋涡和反气旋涡数量相当,而寿命超过52周的涡旋中,反气旋涡占多数。从轨迹分布特征来看,长寿命中尺度涡在陆坡陆架区分布较少,这可能与其生命周期较长,涡旋尺度较大,且受沿岸流的影响较弱有关。在KE区域,气旋涡轨迹主要分布于黑潮主轴南侧,反气旋涡

则集中于北侧。在STCC区域,反气旋涡的轨迹分布较多,气旋涡相对较少,尤其是生命周期超过52周的气旋涡。从运动轨迹特征来看,开阔大洋中涡旋多呈准直线传播,而在流系较强的西边界及洋流交汇区,如日本东部和东南部海域、KE区域等,其传播轨迹多呈缠绕状,这表明,洋流对中尺度涡传播方向有显著的调控作用。



a、b为将涡旋轨迹起点移动到原点的涡旋轨迹;c、d为涡旋寿命大于等于26周的运动轨迹。
a, b are eddy trajectories that move the starting point of the eddy trajectory to the origin; c, d are motion trajectories with eddy lifetimes greater than or equal to 26 weeks.

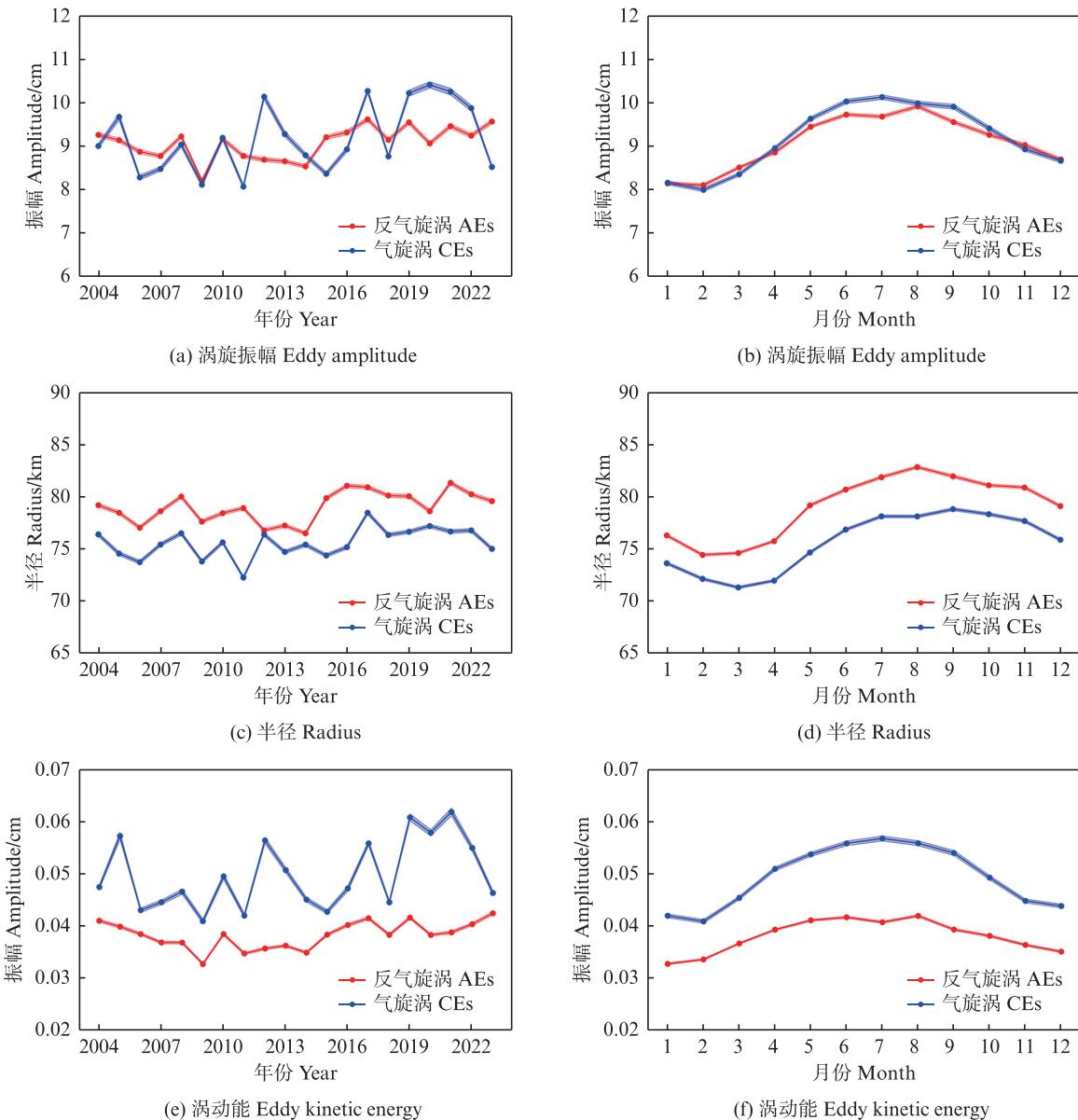
图5 气旋涡和反气旋涡同起点移动轨迹及寿命大于等于26周的运动轨迹

Fig. 5 Trajectories of cyclonic eddies and anticyclonic eddies moving with the same starting point and with lifetimes greater than or equal to 26 weeks

2.1.4 涡旋时间变化特征

对西北太平洋中尺度涡的特征参数在年际变化和月尺度变化中的趋势进行统计(图6)。如图所示,在年际变化上,气旋涡和反气旋涡的振幅、半径和涡动能均没有显著的趋势变化。反气旋涡年均振幅在2017年达到最大值(9.63 cm),在2014年达到最小值(8.55 cm),气旋涡分别在2020年和在2011年达到最大值(10.42 cm)和最小值(8.09 cm)。反气旋涡年均

半径最大值(81.30 km)在2021年,最小值(76.81 km)在2014年,气旋涡最大值(78.47 km)在2017年,最小值(72.33 km)在2011年。反气旋涡年均涡动能分别在2023和2009年取得最大值(0.04 m²/s²)和最小值(0.03 m²/s²),气旋涡在2021年取得最大值(0.06 m²/s²),在2009年取得最小值(0.04 m²/s²)。此外,反气旋涡的振幅和涡动能的大小在2006和2018年有明显下降,在2012和2019年有明显上升。



a、c、e为年际变化; b、d、f为月尺度变化; 阴影部分为统计检验,由 $\mu \pm \sigma(t)/\sqrt{N(t)}$ 计算所得, μ 表示为平均值, σ 为标准差, N 为数据量。
a, c, e are interannual variations; b, d, f are monthly scale variations; The shaded part is the staistical test, which is calculated by $\mu \pm \sigma(t)/\sqrt{N(t)}$, μ is the mean value, σ is the standard deviation, and N is the data amount.

图6 涡旋振幅、半径和涡动能的年际变化和月尺度变化

Fig. 6 Interannual and monthly-scale variations in eddy amplitude, radius and eddy kinetic energy

在月尺度变化上,气旋涡和反气旋涡变化趋势相似:在夏秋季特征参数整体偏高,冬春季普遍偏低。具体而言,气旋涡和反气旋涡的月均振幅在3—6月同步增大,9月到次年2月同步减小,分别在7月和8月达到最大值,均在2月达到最小值。半径的月尺度变化趋势与振幅略有不同,在4—7月同步增大,10月到次年3月同步减小,气旋涡的月均半径在8月达到最大,反气旋涡在9月。这表明半径较大的涡旋多存在于夏季末和

秋季,半径较小的涡旋则多存在于春季。涡动能变化趋势与振幅相似,在3—6月,气旋涡和反气旋涡同步增长,在9月到次年1月同步减小,气旋涡在7月最大,2月最小,反气旋涡在8月最大,1月最小。由涡旋的特征参数归一化演变^[39]可知,涡旋从生长到消亡,其特征是先增大后减小,因此,涡旋生成时,振幅、半径和涡动能都较小,经过数月的发展成熟,达到最大值,后随着消亡逐渐减小。这表明,涡旋参数的月尺度变化与涡旋

的生消过程和发展阶段存在显著的关联。

2.2 涡旋复合特征分析

2.2.1 涡致异常特征

对2006—2009年西北太平洋暖涡和冷涡周围2倍归一化半径范围内海温、海表风速、感热通量和潜热通量异常进行复合分析,获得各海气参数的异常分布图(图7)。如图所示,在暖涡和冷涡上,相同极性的中尺度涡表现出较为一致的异常分布趋势。暖涡能够引起涡旋周围的海温、海表风速、感热通量和潜热通量异常增大,涡致异常极值分别为1.42 °C、0.55 m/s、7.48 W/m²和26.22 W/m²,冷涡能够引起异常减小,涡致异常极值分别为-1.35 °C、-0.33 m/s、-9.53 W/m²和-28.27 W/m²。

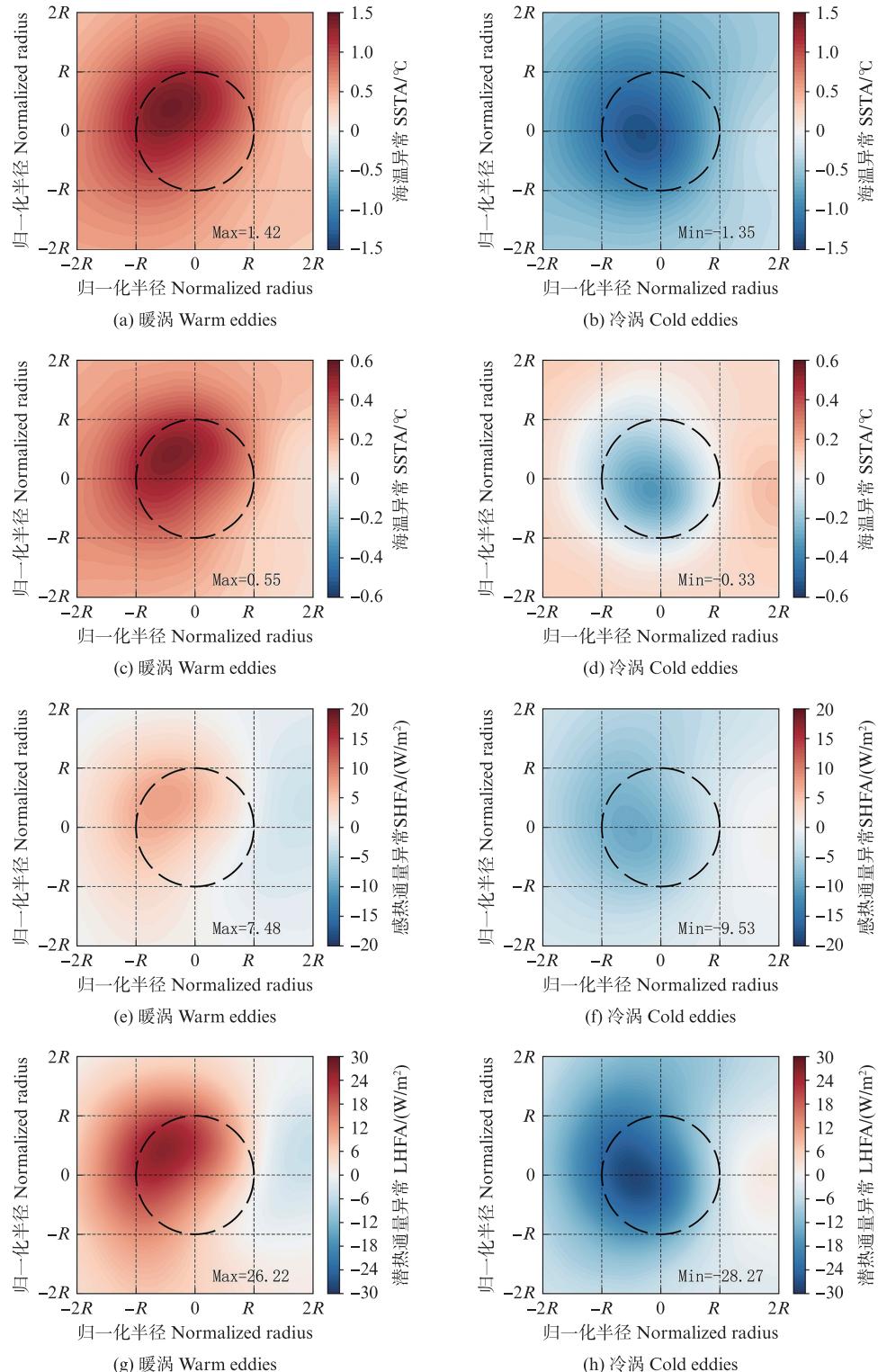
除气旋涡引起的海表风速影响范围较小之外,其他涡致异常的影响范围都超过一个直径 R 的有效圆轮廓。在海温和海表风速上,反气旋涡引起的异常极值大于气旋涡,而在感热通量和潜热通量上,气旋涡引起的异常极值更大。此外,涡旋的影响范围并不是标准的圆形,而是呈椭圆状,这可能是因为中尺度涡的实际形状大多呈非对称性且不规则状^[40]。为探究不同区域与不同季节的涡致异常特征,分别对3个区域不同季节的暖涡和冷涡进行如图7相似的复合分析,由于其图形特征存在一定重复性,在此省略,仅统计最大的涡致异常值(表3)。如表所示,涡致异常存在显著的区域差异性,KE区域的涡旋引起的异常极值最大,STCC区域最小。在季节差异上,3个区域都表现出冬季最大,夏季最小。大多数季节和区域中暖涡引起的异常极值更大,而在夏季的WNP区域和KE区域,冷涡引起的海温异常极值大于暖涡。此外,STCC区域的涡致风速异常也存在差异,表现为冷涡异常极值大于暖涡,且冷涡在夏季还引起了较小的风速正异常,而不是负异常。结合图9,其原因可能是夏季STCC区域平均海温较高且水平梯度较小,大气环流相对稳定,冷涡导致局部SST降低,与周围暖水形

成局地水平温度梯度,根据热成风原理,水平温度梯度会通过垂直风切变影响表层风场,从而驱动表层风速增大(正异常)。此外,当暖湿空气平流至冷涡海面时,大气底层冷却形成稳定边界层(逆温层),抑制垂直湍流动量交换,减少地表动量的向上耗散,下沉运动在近地面层(低层)会引发水平辐合,在背景风场的叠加下,引起海表风速的正异常。在感热通量和潜热通量的异常上,冬季冷涡引起的异常程度较暖涡更大,夏季暖涡引起的异常程度则略大于冷涡。值得注意的是,夏季暖涡在STCC区域引起的潜热通量异常程度比KE区域更大。

2.2.2 涡致异常耦合特征

涡旋通过自身旋转运动引起周围海温的异常变化,从而通过海气相互作用进一步影响上部海表风速、感热通量和潜热通量异常。为了进一步探究各涡致参数异常与海温异常之间的关系,本文将海温异常线性回归其他涡致异常得到的回归系数定义为海温异常与其他涡致参数异常之间的耦合系数^[41]。该方法在以前相似的研究中也曾被应用^[16,42]。对涡旋 $2R \times 2R$ 的复合区间进行统计,将涡旋诱导的海温异常区间间隔定义为0.1 °C,在每个区间内计算相应的涡致参数异常,并使用最小二乘法进行拟合(图8)。为评估拟合优度和显著性,计算了决定系数(R^2)并通过双侧 t 检验获得了回归系数的 P 值。

海表风速、感热通量和潜热通量异常与海温异常之间存在显著的线性关系。暖涡与冷涡的回归模型均表现出很好的拟合优度,表明海温异常可解释97%以上的涡致参数变率,这可能与本研究复合时排除了异常涡旋影响有关。具体而言,暖涡的耦合系数为0.41 m/(s·°C)、13.30 W/(m²·°C)和23.51 W/(m²·°C);冷涡对应系数为0.40 m/(s·°C)、13.18 W/(m²·°C)和24.12 W/(m²·°C)。在海表风速和感热通量的异常上,暖涡耦合系数略大于冷涡,在潜热通量异常上则是冷涡耦合系数略大。



a、b 为海温异常; c、d 为海表风速异常; e、f 为感热通量异常; g、h 为潜热通量异常; 右下角显示了复合图中涡致异常的极值, 复合图中的轴是涡旋中心到涡旋边缘的 $2R$ 之间的归一化距离, 每个图上的虚线为有效涡流半径标记的一个涡流轮廓线。

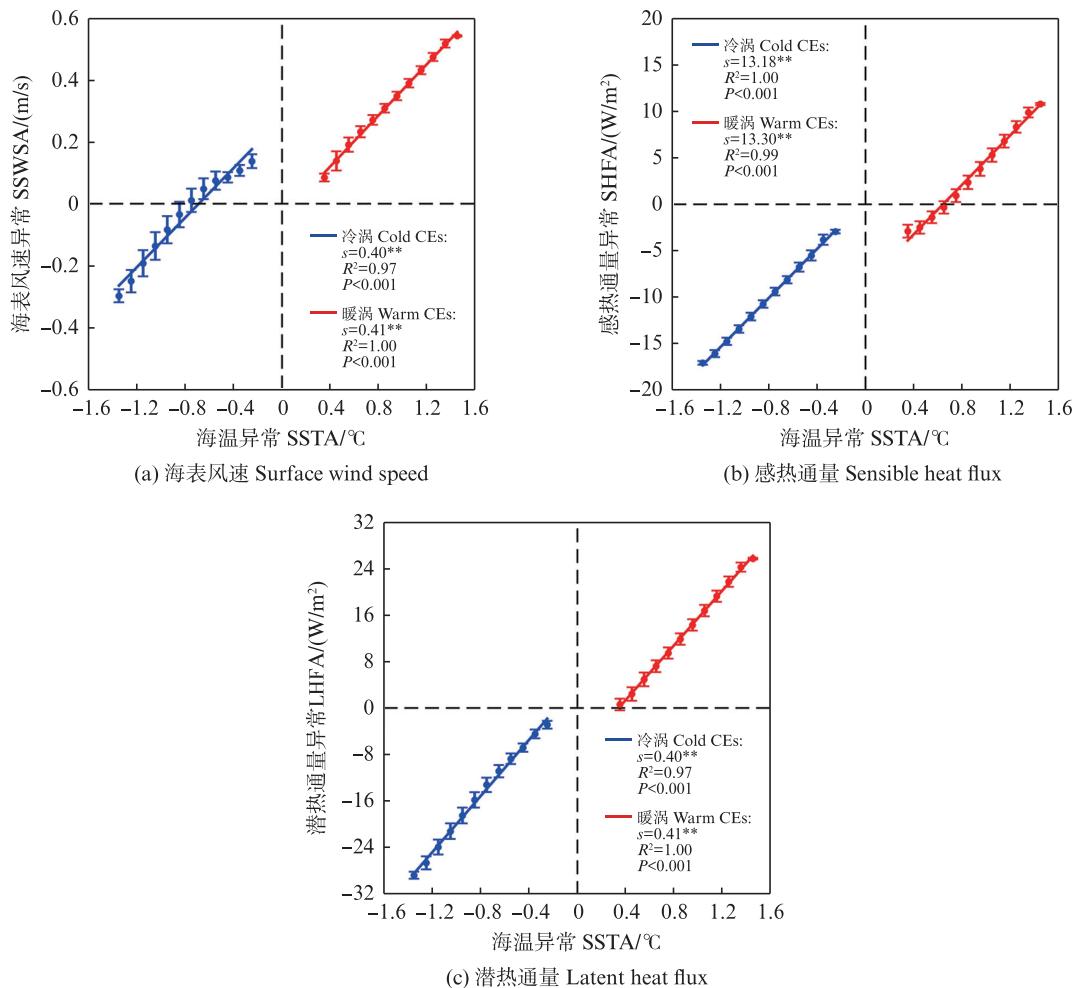
a, b are SST anomalies; c, d are sea surface wind speed anomalies; e, f are sensible heat flux anomalies; g, h are latent heat flux anomalies; The extremes of eddy-causing anomalies in the composite plots are shown in the lower right corner, the axes in the composite plots are the normalized distances between the center of the eddy and the edge of the eddy by a factor of $2R$. The dashed line on each plot is the one eddy contour labeled with the effective eddy radius.

图7 暖涡和冷涡引起的海温、海表风速、感热通量和潜热通量异常

Fig. 7 Anomalies in SST, sea surface wind speed, sensible heat flux and latent heat flux due to warm eddies and cold eddies

表3 暖涡和冷涡在不同区域和季节中复合的涡致异常极值(括号外为暖涡,括号内为冷涡)
 Tab. 3 Composite extremes of eddy-induced anomalies for warm-core (cold-core) eddies across different regions and seasons

区域 Region	季节 Season	海温异常 SSTA/°C	海表风速异常 SSWSA/(m/s)	感热通量异常 SHFA/(W/m ²)	潜热通量异常 LHFA/(W/m ²)
西北太平洋 WNP	不区分	1.42(-1.35)	0.55(-0.33)	10.95(-17.42)	25.85(-29.57)
	冬季	1.56(-1.42)	0.59(-0.48)	12.91(-33.85)	32.77(-47.22)
	夏季	1.17(-1.36)	0.48(-0.11)	6.42(-5.48)	15.23(-12.16)
黑潮延伸区 KE	不区分	1.48(-1.42)	0.62(-0.44)	14.57(-21.44)	31.08(-36.08)
	冬季	1.64(-1.58)	0.72(-0.58)	19.60(-39.25)	40.98(-55.03)
	夏季	1.20(-1.31)	0.56(-0.23)	8.24(-6.82)	19.05(-15.95)
副热带逆流区 STCC	不区分	1.16(-1.05)	0.21(-0.30)	7.48(-9.53)	26.22(-28.27)
	冬季	1.21(-1.03)	0.22(-0.41)	8.08(-13.02)	29.65(-35.50)
	夏季	1.11(-0.98)	0.18(0.12)	6.09(-4.62)	27.00(-14.33)



图中点代表平均参数,而误差条代表异常的 ± 1 标准差,直线代表各参数异常和海温异常之间线性拟合, s 为拟合系数,拟合优度由决定系数 R^2 量化, **表示 $P<0.01$ 的显著性水平(双尾t检验),表明拟合系数在99%置信区间内显著异于零。

Solid circles represent mean values of parameters with error bars indicating ± 1 standard deviation of anomalies. Solid lines denote linear regression fits between parameter anomalies and sea surface temperature anomalies (SSTA), where the slope coefficient s quantifies the response sensitivity of parameters to SSTA. The goodness of fit is evaluated by the coefficient of determination (R^2), representing the proportion of variance explained by SSTA. Double asterisks (**) indicate statistical significance at $P<0.01$ (two-tailed t-test), demonstrating that the regression slope is significantly different from zero at the 99% confidence level.

图8 暖涡与冷涡引起的海表风速、感热通量及潜热通量异常随海温异常的变化关系

Fig. 8 Anomalies in sea surface wind speed, sensible heat flux, and latent heat flux induced by warm/cold eddies versus sea surface temperature anomaly

同时,对于涡致异常的耦合,本研究也进行了区域差异性和季节差异性统计(表4)。如表所示,在海温异常与海表风速异常的耦合上,区域差异性并不显著,耦合系数在3个区域中相差不大,海温异常与感热通量异常的耦合系数在KE区域大,在STCC区域小,海温异常与潜热通量异常的耦合则是在KE区域小,在STCC区域大。在季节差异性上,海温异常与海表风速异常的耦合除KE区域的差异较显著外,其他区域相差不大,且暖涡和冷涡的耦合系数大小差异也不显著。KE区域冬

季的海温异常能够引起最大的风速异常,暖涡(冷涡)1 °C的海温异常分别能够引起0.49(0.50) m/s的海表风速异常增大(减小)。在海温异常与感热通量、潜热通量异常的耦合上,冬季与夏季的耦合系数有明显的差异,冬季约是夏季的2倍甚至更大。此外,STCC区域潜热通量异常的耦合系数是3个区域中最大的,结合表3,在潜热通量上,STCC区域除夏季较其他区域更大外,其他情况都较小,表明夏季同样的海温异常,在STCC区域能够引起更大的潜热通量异常。

表4 暖涡和冷涡在不同区域和季节中的涡致异常耦合系数(括号外为暖涡,括号内为冷涡)

Tab. 4 Coupling coefficients of eddy-induced anomalies for warm and cold eddies in different regions and seasons
(warm eddies outside parentheses, cold eddies inside parentheses)

区域 Region	季节 Season	海温异常与海表风速异常耦合 SSTA-SSWSA/ [m/(s·°C)]	海温异常与感热通量异常耦合 SSTA-SHFA/ [W/(m ² ·°C)]	海温异常与潜热通量异常耦合 SSTA-LHFA/ [W/(m ² ·°C)]
西北太平洋 WNP	不区分	0.41(0.40)	13.30(13.18)	23.51(24.12)
	冬季	0.37(0.34)	17.27(18.42)	27.97(28.80)
	夏季	0.36(0.39)	6.63(6.19)	14.22(14.28)
黑潮延伸区 KE	不区分	0.40(0.42)	14.56(14.37)	25.24(25.44)
	冬季	0.36(0.34)	19.57(20.04)	30.91(29.96)
	夏季	0.49(0.50)	7.71(7.50)	16.16(17.25)
副热带逆流区 STCC	不区分	0.36(0.40)	10.23(10.05)	30.24(31.02)
	冬季	0.29(0.36)	11.72(11.69)	33.61(32.96)
	夏季	0.30(0.28)	6.62(6.26)	22.82(24.41)

3 讨论

为了提高涡旋的识别和追踪效率,本研究使用了最新的涡旋识别算法,该算法较以往的涡旋识别算法,在对黑潮、湾流等非均匀地形中的中尺度涡进行识别时,具有更好的检测效率^[24]。此外,本研究在进行涡旋复合分析时,排除了冷核暖涡和暖核冷涡等异常涡旋对常规的暖涡和冷涡复合的影响,能够更加充分地体现出海洋和气象参数对绝大多数暖涡和冷涡的响应特征。

3.1 涡旋统计与复合差异分析

在本研究中,通过拉格朗日法统计的反气旋涡有9 206个,气旋涡有9 912个。通过欧拉法统计的反气旋涡有638 598个,气旋涡有630 373个。涡旋识别结果远大于早期秦丽娟等^[43]对北太平洋1993—2012年的涡旋识别结果,这表明该研究的涡旋识别算法与早期研究相比识别效率更高。与袁泉木等^[44]的反气旋涡统计结果存在差异,相对于开阔大洋,地形的原因使得边缘海

气旋涡的生成数量更多^[37],而本研究未对边缘海进行统计,因此欧拉法统计的反气旋涡多于气旋涡。在涡旋特征统计上,本研究统计的涡旋平均特征参数与袁泉木等^[44]统计的1993—2019年西北太平洋涡旋半径和寿命相似,但其振幅小于本研究所统计的振幅,可能是因为统计年限不同,且本研究区域未包含边缘海。此外,本研究统计的寿命比崔伟等^[8]统计的西北太平洋涡旋的寿命略小,可能是涡旋识别追踪算法和所选研究区不同所造成的。中尺度涡的生消、特征分布与大多数研究一致,即涡旋的生成高频区也是消亡高频区,其生成和消亡分别与黑潮的高能量和西部边界的地形阻碍有关^[38,44]。在崔伟等^[8]的研究中,涡旋在东部边界160°E有明显的生成高频区,这可能与其研究区域东部边界选为160°E有关。涡旋特征的高值区主要集中在黑潮延伸区和副热带逆流区,与众多学者之前的研究结果一致^[8,38,44-45],由此可知,不同的涡旋识别追踪算法对涡旋数目统计差异影响较大,对涡旋特征参数

分布影响较小。在涡旋运移规律上,本研究与以往西北太平洋海域的研究结果相符,即大多数涡旋都有显著的西移趋势,这与 CHELTON 等^[26]对全球涡旋的运动特征的研究结果一致。在以往研究中,对中尺度涡特征随时间的变化研究较少,本研究结果整体变化趋势与袁泉木等^[44]一致,不同的是,本研究气旋涡和反气旋涡振幅分别在 7 月和 8 月达到最大值,半径分别在 8 月和 9 月达到最大值,其差异可能源于研究区域的选择不同,研究区域范围越小,越容易受背景流场和海气边界条件的影响,产生季节性差异。

在复合分析中,本研究参考前人的研究^[34],根据中尺度涡的极性及其半径范围内的海温异常极值来区分暖涡和冷涡,在涡旋复合中进一步排除了异常涡旋(暖核气旋涡和冷核反气旋涡)的影响。同时,为了体现涡致异常的显著性,选择了中尺度涡振幅大于 1 cm、有效半径在 25~155 km 且中尺度涡半径 R 内海温极值大于 1 °C 的常规暖涡和小于 -1 °C 的常规冷涡进行复合。本研究所得的异常分布趋势与之前学者对西北太平洋区域中涡旋引起的异常分布趋势一致,即暖涡和冷涡分别引起涡旋周围海气参数的正异常和负异常^[16, 28, 46~47],涡致异常还存在区域差异性^[29]和季节差异性^[18, 28, 35]。与本研究不同的是, MA 等^[16]和 JI 等^[29]的研究中,有一部分海气参数的异常中心与涡旋轮廓无明显的偏移,可能与其海气参数数据选用的是 3 d 平均数据且进行了一定平滑有关。此外,本研究得到的涡旋上的异常极值量级比其他研究更大,一方面是因为本研究对异常涡旋进行筛选和排除,另一方面是选择了海温异常较大的显著涡旋进行复合。

3.2 涡致异常及耦合差异性分析

本研究证实,中尺度涡引起的海温异常(Sea surface temperature anomaly, SSTA)及其关联的海气参数异常与背景海温梯度的区域和季节差异密切相关,但其物理过程需进一步解析。以往学者研究指出,涡致 SSTA 由水平平流和垂直对流主导^[41, 47],而本研究表明,背景海温梯度的空间分布(如 KE 区冬季梯度显著强于 STCC 区夏季)通过调制垂向热输运效率,成为异常幅度的主控因子。具体而言,冷涡通过 Ekman 辐合诱发下沉流^[41],抑制混合层加深并减少下层冷水的垂向夹卷,从而维持表层低温异常;而背景海温梯度较

大的区域(如 KE 冬季)因垂向锋面结构更陡峭,进一步放大了这一过程的贡献(图 9a 和 9b)。此外,涡旋通过改变海表面粗糙度间接影响风应力分布,冷涡区 SST 降低导致大气边界层稳定化,抑制湍流混合并降低海表面粗糙度^[15],从而减少风应力耗散,这一反馈在背景风速较高的 KE 冬季尤为显著(图 9c 和 9d),与 JIA 等^[48]的风速敏感性实验一致。

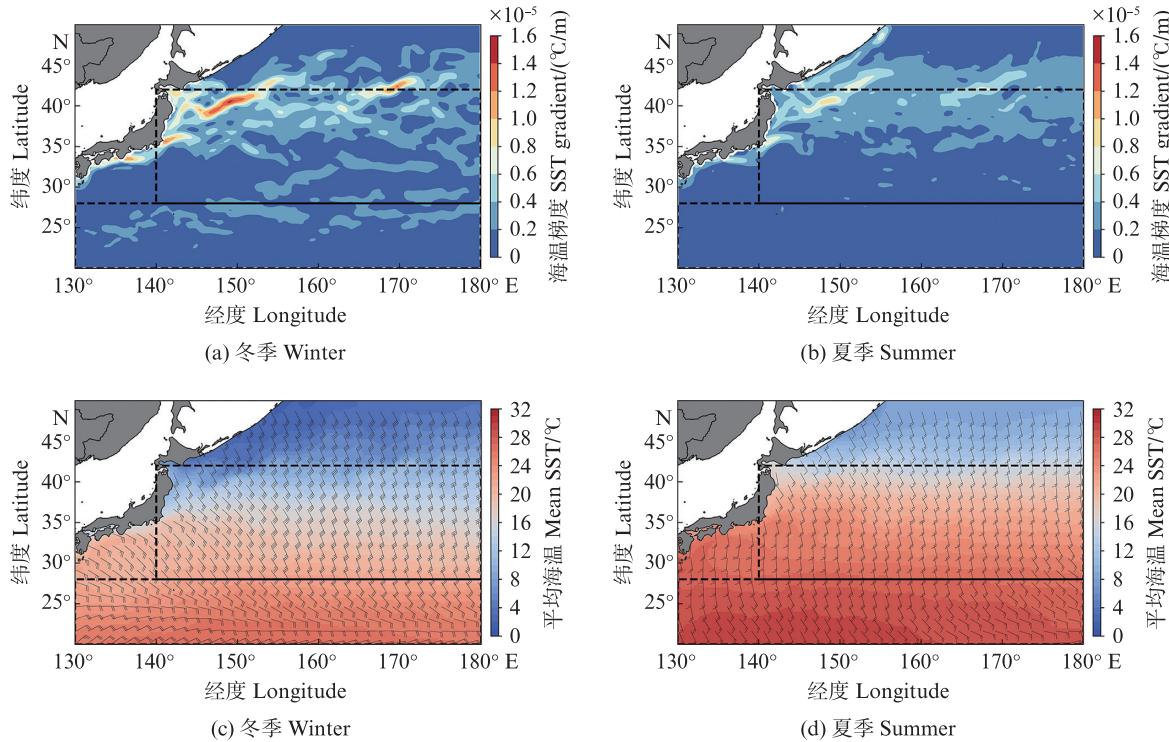
感热与潜热通量异常与混合层深度(Mixed layer depth, MLD)及垂向温湿度梯度紧密耦合。冷涡(气旋式)引起 MLD 变浅,通过降低海洋热容量,使得相同热通量扰动产生更强的 SSTA;同时,浅 MLD 抑制蒸发作用,削弱潜热通量负异常。GAUBE 等^[49]的研究表明,中尺度涡对 MLD 的调制在冬季最为显著且暖涡的 MLD 普遍深于冷涡。其可能机制可追溯至涡致 SST 异常对对流混合的调控:当气温低于 SST 时(如冬季 KE 区),暖涡的正 SST 异常加剧表面热损耗,促进垂向对流混合,导致 MLD 加深;而冷涡的负 SST 异常抑制热损耗,削弱混合作用,MLD 趋浅^[41, 50~51]。但同时也要注意,热通量也受到其他因素的影响,如风速或海洋表面与低层大气之间的垂直温度和湿度梯度(分层)^[52],涡旋的大小^[53]等。

在涡致异常耦合方面,与 JI 等^[29]的研究不同,海温异常与海表风速、感热通量和潜热通量异常的复合并未表现出明显的区域性差异和季节性差异,其原因可能与研究区域的划分不同有关。除海表风速异常以外,其余参数异常的耦合都有明显的季节性差异,在冬季最强,夏季最弱,与 SUN 等^[35]以往研究一致,但耦合系数更大,表明在无异常涡旋的影响下,海温异常能引起更大的海气参数异常。值得注意的是,尽管冬季风力更强、更稳定,但 KE 区域夏季的耦合系数普遍大于冬季。这一发现与 SUN 等^[54]的研究结果类似。其原因可能是由于在该地区这两个季节海洋大气边界层结构不同造成的^[21]。

本研究系统探讨了西北太平洋中尺度涡上的海气参数异常特征,有助于从多个角度理解中尺度涡活动规律及其上部的海气相互作用。但对于影响涡旋产生和演变的斜压不稳定和复杂的涡流相互作用对海气耦合关系的影响,本研究认为除受到大气边界层特性、季节变化以及区域动力环境因素外,中尺度涡自身参数特征的变

化,也将对海气异常及耦合存在一定影响。涡致海气参数异常的区域与季节差异不仅依赖于背景海温梯度和风速,还受到Ekman抽吸、粗糙度

反馈、混合层调节及边界层稳定性等多个过程的协同作用,未来需通过高精度区域耦合模型量化各个机制的相对贡献。



a、b 为海温梯度; c、d 图中填色部分为平均海温; 风羽短线代表风速 2 m/s, 长线代表风速 4 m/s。
a, b are SST gradients; c, d the filled-in parts of the graphs are mean SSTs; The short lines of the wind plume represent wind speeds of 2 m/s and the long lines represent wind speeds of 4 m/s.

图9 西北太平洋 2006—2009年冬季、夏季的海温梯度、平均海温和风矢量分布

Fig. 9 Distribution of SST gradients, mean SST and wind vectors in the Northwestern Pacific for winter and summer 2006–2009

4 结论

本文基于 2004—2023 年逐日的卫星高度计数据,对西北太平洋 20 年的中尺度涡进行识别、追踪和统计分析,获取了涡旋的空间分布、运动轨迹和时间变化等特征。基于涡旋数据集和卫星散射计数据,对 2006—2009 年西北太平洋 30 000+ 中尺度暖涡和冷涡进行复合分析,探究了暖涡和冷涡对其上部海气参数的调控作用。主要结论如下:

(1) 西北太平洋气旋涡生成数多于反气旋涡,涡旋生成地主要在 KE 区域北部、STCC 区域东部和千岛群岛边缘附近,消亡地主要在 KE 区域北部。中尺度涡半径在 KE 和 STCC 区域较大,振幅和涡动能在 KE 地区较大。涡旋的移动轨迹受背景流场和 β 效应的影响,在日本东部和千岛

群岛附近海域多存在盘旋缠绕现象,在开阔大洋内较少。大多数中尺度涡生成后向西移动,少数存在东移的趋势,主要是受黑潮及其延伸区强背景流和地形的影响。中尺度涡半径、振幅和涡动能存在明显的月尺度变化,在 6—9 月最大,在 1—3 月最小。

(2) 西北太平洋暖涡和冷涡能够诱导 2 倍归一化半径内明显的海温、海表风速、感热通量和潜热通量异常,在暖涡和冷涡中心附近具有最大的异常值,暖(冷)涡诱导海温、海表风速、感热通量和潜热通量异常在冬季的 KE 区域最大,其极值分别是 $1.64 (-1.58)^\circ\text{C}$ 、 $0.72 (-0.58) \text{ m/s}$ 、 $19.60 (-39.25) \text{ W/m}^2$ 和 $40.98 (-55.03) \text{ W/m}^2$ 。此外,涡致异常极值中心与涡旋中心存在一定的位置差异,主要表现为极值中心相对涡旋中心向西偏移,其原因可能是受 β 效应的影响,中尺度涡整体

倾向于向西传播,西移导致涡旋的动力场与热力场之间因平流作用而产生的相位差。

(3) 中尺度涡上的海表风速、感热通量和潜热通量异常与海温异常具有良好的耦合关系,其空间分布与海温异常呈现较为一致的分布格局。通过涡致海温异常线性回归其他涡致海气参数异常,表明海表风速、感热通量与潜热通量异常与海温异常存在显著的线性相关,暖(冷)涡的最大耦合系数分别为 $0.49(0.50) \text{ m/(s}\cdot\text{}^{\circ}\text{C)}$ 、 $19.57(20.04) \text{ W/(m}^2\cdot\text{}^{\circ}\text{C)}$ 和 $33.61(32.96) \text{ W/(m}^2\cdot\text{}^{\circ}\text{C)}$ 。这些现象表明海洋暖(冷)涡通过加热(冷却)大气边界层,使得大气变得不稳定(稳定),增强(减弱)了垂直混合作用,体现了垂直混合机制的特征。

(4) 涡致海气参数异常及其耦合存在区域性和季节性差异,表现为KE区域较强,STCC区域较弱,冬季较强,夏季较弱。研究表明,背景海温梯度的空间分布通过调制垂向热输运效率,成为异常幅度的主控因子,背景风的增加通过增强海表粗糙度响应,显著放大冷涡引起的风应力耗散减弱效应。同时也应当注意,区域与季节差异不仅依赖于背景海温梯度和海表风速,还受到Ekman抽吸、粗糙度反馈、混合层调节及边界层稳定性等多个过程协同作用,未来需通过高精度区域耦合模型量化各个机制的相对贡献。

尽管本研究揭示了西北太平洋及典型涡动能高值区的中尺度涡特征及其对海气参数的调制作用,但仍存在一定局限性:受研究数据时空分辨率限制,复合分析所用卫星散射计数据较为单一且年限较为久远,数据时间跨度较短,可能对次中尺度过程及涡旋边缘动力-热力耦合的精细化解析不足;涡旋识别算法和线性回归方法可能弱化弱涡信号与非线性的影响,且对垂直结构、 β 效应与背景流的定量贡献分析不足;此外,跨区域能量传递、长期气候变化响应及生物地球化学效应尚未涉及。未来需利用当下的融合高分辨率卫星、浮标观测资料与高精度区域耦合模型,揭示涡旋对海气界面的多尺度反馈机制,并结合气候模态分析及生物地球化学参数,拓展中尺度涡在区域能量平衡与生态调控中的综合作用。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] DONG C M, MCWILLIAMS J C, LIU Y, et al. Global heat and salt transports by eddy movement[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3294.
- [3] FRENGER I, GRUBER N, KNUTTI R, et al. Imprint of Southern Ocean eddies on winds, clouds and rainfall[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(8): 608-612.
- [4] 黎伟标, 刘昊亚, 方容. 大气对海洋中尺度涡响应的研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(10): 1039-1049.
- [5] LI W B, LIU H Y, FANG R. Review of the atmospheric response to the ocean mesoscale eddies[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(10): 1039-1049.
- [6] BERNSTEIN RL, WHITEW B, et al. Zonal variability in the distribution of eddy energy in the mid-latitude North Pacific Ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1977, 7(1): 123-126.
- [7] 林宏阳, 胡建宇, 郑全安. 南海及西北太平洋卫星高度计资料分析: 海洋中尺度涡统计特征[J]. 台湾海峡, 2012, 31(1): 105-113.
- [8] LIN H Y, HU J Y, ZHENG Q A. Satellite altimeter data analysis of the South China Sea and the northwest Pacific Ocean: statistical features of oceanic mesoscale eddies [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2012, 31(1): 105-113.
- [9] 祖永灿, 方越, 高晓倩, 等. 北太平洋中尺度涡季节和年际变化的统计分析[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(2): 197-206.
- [10] ZU Y C, FANG Y, GAO X Q, et al. Seasonal and interannual variation of mesoscale eddies in the North Pacific Ocean: a statistical analysis [J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(2): 197-206.
- [11] 崔伟, 王伟, 马毅, 等. 基于1993—2014年高度计数据的西北太平洋中尺度涡识别和特征分析[J]. 海洋学报, 2017, 39(2): 16-28.
- [12] CUI W, WANG W, MA Y, et al. Identification and analysis of mesoscale eddies in the Northwestern Pacific Ocean from 1993—2014 based on altimetry data [J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(2): 16-28.
- [13] JI J L, DONG C M, ZHANG B, et al. Oceanic eddy characteristics and generation mechanisms in the kuroshio extension region [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(11): 8548-8567.
- [14] 张智晟, 谢玲玲, 李君益, 等. 边缘海与开阔海中尺度涡生命周期演化规律对比分析: 以南海和黑潮延伸体为例[J]. 热带海洋学报, 2023, 42(4): 63-76.
- [15] ZHANG Z S, XIE L L, LI J Y, et al. Comparative analysis of mesoscale eddy evolution during life cycle in

- marginal seaand open ocean: South China Sea and Kuroshio Extension [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2023, 42(4): 63-76.
- [11] BBUSINGER J A, SHAW W J. The response of the marine boundary layer to mesoscale variations in sea-surface temperature [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1984, 8(3/4): 267-281.
- [12] WAI M M K, STAGE S A. Dynamical analyses of marine atmospheric boundary layer structure near the Gulf Stream oceanic front [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1989, 115(485): 29-44.
- [13] SMALL R J, XIE S P, WANG Y Q. Numerical simulation of atmospheric response to pacific tropical instability waves[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(22): 3723-3741.
- [14] O'NEILL W, CHELTON D B, ESBENSEN S K, et al. High-Resolution satellite measurements of the atmospheric boundary layer response to SST variations along the agulhas return current [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(14): 2706-2723.
- [15] SMALL R J, DESZOEKE S P, XIE S P, et al. Air - sea interaction over ocean fronts and eddies[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2008, 45(3/4): 274-319.
- [16] MA J, XU H M, DONG C M, et al. Atmospheric responses to oceanic eddies in the Kuroshio Extension region [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(13): 6313-6330.
- [17] CAI Z Y, XU H M, MA J, et al. Climatic effects of spring mesoscale oceanic eddies in the north pacific: a regional modeling study[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(4): 517.
- [18] SUN B W, LI B F, YAN J Y, et al. Seasonal variation of atmospheric coupling with oceanic mesoscale eddies in the North Pacific Subtropical Countercurrent [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 41(10): 109-118.
- [19] REYNOLDS R W, SMITH T M, LIU C Y, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20 (22) : 5473-5496.
- [20] RICCIARDULLI L, WENTZ F. Reprocessed QuikSCAT (V04) wind vectors with Ku-2011 geophysical model function[J]. *Remote Sensing Systems Tech Rep*, 2011: 043011.
- [21] CHELTON D B, SCHLAX M G, FREILICH M H, et al. Satellite measurements reveal persistent small-scale features in ocean winds[J]. *Science*, 2004, 303(5660) : 978-983.
- [22] SAMPE T, XIE S P. Mapping high sea winds from space: a global climatology[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(12): 1965-1978.
- [23] MASON E, PASCUAL A, MCWILLIAMS J C. A new sea surface height - based code for oceanic mesoscale eddy tracking [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(5): 1181-1188.
- [24] PEGLIASCO C, DELEPOULLE A, MORROW R, et al. META3. 1exp: a new global mesoscale eddy trajectories atlas derived from altimetry[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 14(3): 1087-1107.
- [25] CHAIGNEAU A, GIZOLME A, GRADOS C. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns [J]. *Progress in Oceanography*, 2008, 79 (2/4) : 106-119.
- [26] CHELTON D B, SCHLAX M G, SAMELSON R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies [J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167-216.
- [27] ZHANG Z G, QIU B. Evolution of submesoscale ageostrophic motions through the life cycle of oceanic mesoscale eddies [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(21): 11847-11855.
- [28] MA J, XU H M, DONG C M. Seasonal variations in atmospheric responses to oceanic eddies in the Kuroshio Extension [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2016, 68(1): 31563.
- [29] JI J L, MA J, DONG C M, et al. Regional dependence of atmospheric responses to oceanic eddies in the North Pacific Ocean[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1161.
- [30] 李英, 陈联寿, 雷小途. Winnie(1997)和Bilis(2000)变性过程的湿位涡分析[J]. 热带气象学报, 2005, 21 (2): 142-152.
- [31] LI Y, CHEN L S, LEI X T. Moisture potential vorticity analysis on the extratropical transition processes of Winnie (1997) and Bilis (2000) [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2005, 21(2): 142-152.
- [32] ITOH S, YASUDA I. Water mass structure of warm and cold anticyclonic eddies in the western boundary region of the subarctic North Pacific [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(12): 2624-2642.
- [33] NI Q B, ZHAI X M, JIANG X M, et al. Abundant cold anticyclonic eddies and warm cyclonic eddies in the global ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51 (9): 2793-2806.
- [34] SUN W J, AN M X, LIU J, et al. Comparative analysis of four types of mesoscale eddies in the Kuroshio-Oyashio extension region[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 984244.
- [35] CHEN Y X, YU L S. Mesoscale meridional heat transport inferred from sea surface observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(5): e2023GL106376.
- [36] SUN J X, ZHANG S P, NOWOTARSKI C J, et al. Atmospheric responses to mesoscale oceanic eddies in the

- winter and summer north pacific subtropical countercurrent region [J]. *Atmosphere*, 2020, 11(8) : 816.
- [36] CHEN G X, HOU Y J, CHU X Q. Mesoscale eddies in the South China Sea: mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116 (C6): C06018.
- [37] 杨霄, 张永垂, 夏长水, 等. 日本海中尺度涡旋时空变化特征研究[J]. *海洋学报*, 2022, 44(6): 22-36.
- YANG X, ZHANG Y C, XIA C S, et al. Spatiotemporal variations of mesoscale eddies in the Japan Sea [J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(6): 22-36.
- [38] 罗娜, 宋军, 郭俊如, 等. 西北太平洋不同寿命中尺度涡统计特征[J]. *应用海洋学报*, 2023, 42(2): 277-291.
- LUO N, SONG J, GUO J R, et al. Statistical characteristics of different lifetime mesoscale eddies in the Northwest Pacific Ocean by reanalyzed data [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2023, 42(2): 277-291.
- [39] LIN X Y, DONG C M, CHEN D K, et al. Three-dimensional properties of mesoscale eddies in the South China Sea based on eddy-resolving model output [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 99: 46-64.
- [40] WANG H L, QIU B, LIU H R, et al. Doubling of surface oceanic meridional heat transport by non-symmetry of mesoscale eddies [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 5460.
- [41] GAUBE P, CHELTON D B, SAMELSON R M, et al. Satellite observations of mesoscale eddy-induced ekman pumping [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2015, 45(1): 104-132.
- [42] O'NEILL L W, CHELTON D B, ESBENSEN S K. The effects of SST-Induced surface wind speed and direction gradients on midlatitude surface vorticity and divergence [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(2): 255-281.
- [43] 秦丽娟, 董庆, 樊星, 等. 卫星高度计的北太平洋中尺度涡时空分析[J]. *遥感学报*, 2015, 19(5): 806-817.
- QIN L J, DONG Q, FAN X, et al. Temporal and spatial characteristics of mesoscale eddies in the North Pacific based on satellite altimeter data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(5): 806-817.
- [44] 袁泉木, 胡建宇. 西北太平洋及其邻近边缘海中尺度涡的时空特征分析[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2023, 62(3): 413-424.
- YUAN Q M, HU J Y. Spatiotemporal characteristics analyses of mesoscale eddies in the Northwestern Pacific and its adjacent marginal seas [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2023, 62(3): 413-424.
- [45] 胡冬, 陈希, 毛科峰, 等. 黑潮延伸体邻近区域中尺度涡特征统计分析[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(3): 497-511.
- HU D, CHEN X, MAO K F, et al. Statistical characteristics of mesoscale eddies near the Kuroshio Extension region [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(3): 497-511.
- [46] 徐全倩, 徐海明, 马静. 与夏季北太平洋副热带中尺度海洋涡旋相联系的海气关系[J]. *大气科学*, 2018, 42 (6): 1191-1207.
- XU Q Q, XU H M, MA J. Air-Sea relationship associated with mesoscale oceanic eddies over the subtropical North Pacific in Summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(6): 1191-1207.
- [47] SUN B W, LIU C Y, WANG F. Eddy induced SST variation and heat transport in the western North Pacific Ocean [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2020, 38(1): 1-15.
- [48] JIA Y L, CHEN L J, LIU Q Y, et al. The role of background wind and moisture in the atmospheric response to oceanic eddies during winter in the kuroshio extension region [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(9): 527.
- [49] GAUBE P, MCGILLICuddy Jr D J, MOULINA J, et al. Mesoscale eddies modulate mixed layer depth globally [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(3): 1505-1512.
- [50] WILLIAMS R G. Modification of ocean eddies by air-sea interaction [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1988, 93(C12): 15523-15533.
- [51] HAUSMANN U, CZAJA A. The observed signature of mesoscale eddies in sea surface temperature and the associated heat transport [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2012, 70: 60-72.
- [52] AGUEDJOU H M A, CHAIGNEAU A, DADOU I, et al. Imprint of mesoscale eddies on air-sea interaction in the tropical Atlantic Ocean [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15 (12): 3087.
- [53] LIN Y J, WANG G H. The effects of eddy size on the sea surface heat flux [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(23): e2021GL095687.
- [54] SUN S W, FANG Y, LIU B C, et al. Coupling between SST and wind speed over mesoscale eddies in the South China Sea [J]. *Ocean Dynamics*, 2016, 66(11): 1467-1474.

Analysis of air-sea parameter anomalies associated with mesoscale eddies in the Northwestern Pacific

LONG Fengxin, GAO Guoping, MIAO Qiaolong, BIAN Sijin

(College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Mesoscale eddies play a pivotal role in oceanic material transport, energy exchange, and climate variability modulation. To understand their impacts on air-sea interactions in the Northwestern Pacific, this study analyzes satellite altimeter and scatterometer data (2006—2009) using eddy identification and composite analysis techniques, focusing on over 30 000 warm and cold eddies. Results demonstrate distinct air-sea parameter anomalies: warm (cold) eddies exhibit positive (negative) anomalies in sea surface temperature (SST, $1.64/-1.58^{\circ}\text{C}$), surface wind speed ($0.72/-0.58 \text{ m/s}$), sensible heat flux ($19.60/-39.25 \text{ W/m}^2$), and latent heat flux ($40.98/-55.03 \text{ W/m}^2$); these atmospheric responses show strong linear coupling with SST anomalies, with maximum coefficients of $0.49/0.50 \text{ m/(s}\cdot^{\circ}\text{C)}$ (wind), $19.57/20.04 \text{ W/(m}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$ (sensible heat), and $33.61/32.96 \text{ W/(m}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$ (latent heat). Regional and seasonal variations in anomalies are modulated by background SST gradients and wind fields through vertical heat transport efficiency and surface roughness modification; synergistic mechanisms involving Ekman pumping, mixed layer adjustment, and boundary layer stability further contribute to these patterns. This study underscores the need for eddy-resolving coupled models to quantify mechanistic contributions and provides critical insights for improving air-sea parameter forecasting in eddy-active regions.

Key words: mesoscale eddies; air-sea coupling; composite analysis; Northwestern Pacific