

中尺度涡调制下全球海洋遥感特征相关性分析

黄春铭¹, 陈笑炎¹, 王璇^{1,3*}, 陈戈^{1,2}

1. 中国海洋大学 信息科学与工程学部, 山东 青岛 266100;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266100;

3. 潍坊学院 物理与光电学院, 山东 潍坊 261061

摘要: 本文旨在探寻反气旋性涡旋 (AE)、气旋性涡旋 (CE) 调制下海表特征的相关性分布及其与涡旋外部 (OE) 区域的差异, 为进一步厘清中尺度涡对海气界面的调制机制, 改进海洋数值模拟提供理论依据。本文利用 2010–2019 年长时序遥感观测数据以及皮尔逊积距相关系数、涡旋识别等方法, 系统分析了全球中尺度涡调制下海表温度异常、海面高度异常、叶绿素浓度异常、风速异常四种参数相关性的时空分布特征及其差异。结果表明, 各参数之间相关性分布赤道太平洋地区相关性最强, 印度洋地区以及北美洲西南岸相关性较为显著, 其他地区相关性偏弱, 且各参数分布呈现出较强的涡旋信号。此外, 各参数的相关系数在 OE 中相比于 CE 以及 AE 内部降低 0.2 左右, 相关系数分布的平滑程度约为 AE 与 CE 中相关系数分布的 20 倍, 且相关性相反两区域之间存在明显的过渡区域。可以得出结论中尺度涡调制下各参数的相关性分布表现很强的地域特征, 其差异主要表现在相关程度以及整体平滑性方面。

关键词: 遥感观测, 中尺度涡, 耦合分析, 海表温度, 海面高度, 叶绿素浓度, 风速

中图分类号: P2

引用格式: 黄春铭, 陈笑炎, 王璇, 陈戈. XXXX. 中尺度涡调制下全球海洋遥感特征相关性分析. 遥感学报, XX(XX): 1–15

HUANG Chunming, CHEN Xiaoyan, WANG Xuan, CHEN Ge. XXXX. Correlation analysis of the sea-surface features under eddy modulation in the global ocean using remote sensing data. National Remote Sensing Bulletin, DOI:10.11834/jrs.20241830]

1 引言

中尺度涡是空间尺度在几十到几百千米之间, 寿命在几天到几百天之间的封闭环流, 广泛分布于全球各大洋 (Chen 和 Han, 2019; Chelton 等, 2011), 覆盖了全球海洋表面的 40% 以上, 包含了大约 90% 的海洋总动能 (Klein 和 Lapeyre, 2009; Ferrari 和 Wunsch, 2010; Chen 等, 2021), 参与多种海洋过程, 蕴含极高的能量, 对于海洋中物质循环、能量流动以及圈层耦合都产生重大影响 (陈戈等, 2021)。中尺度涡根据旋转方向, 可以分为气旋性涡旋 (Cyclonic eddy, CE) 与反气旋性涡旋 (Anticyclonic eddy, AE)。此前, 已有大量研究 (郑晓莉等, 2020; 刘颖洁等, 2020; Chelton 等, 2007, 2011; Zhao 等, 2021; Park 等, 2020;

Frenger 等, 2013) 表明中尺度涡会对海表温度 (Sea Surface Temperature, SST)、海面高度 (Sea surface height, SSH)、海面风速 (Wind Speed, WS) 以及海洋叶绿素浓度 (Chlorophyll, CHL) 等关键海洋参数造成不可忽视的影响。并且, 有诸多学者对中尺度涡调制海气环境的机制进行了研究, 提出涡致海温异常模式 (Sun 等, 2019)、涡旋扰动近地表风过程 (Frenger 等, 2013)、涡旋影响 CHL 分布的四种机制 (Siegel 等, 2011) 等精彩理论, 并就涡旋影响 CHL 四种机制及其产生的过程、影响和多发区域已进行过较为详细的研究 (Siegel 等, 2011; Chelton 等, 2011; Gaube 等, 2013, 2019)。由此可见, 中尺度涡与海洋关键参数的耦合分析对于海洋研究来说是重要的一环。

收稿日期: XXXX-XX-XX; 预印本: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (编号: 42106192)、可持续发展大数据国际研究中心项目“深蓝海洋大数据中心” (编号: CBAS2022GSP01)、中国博士后基金项目 (编号: 2021M693018)

第一作者简介: 黄春铭, 研究方向为海洋遥感与海洋大数据分析。E-mail: huangchunming1998@163.com

通信作者简介: 王璇, 研究方向为海洋遥感与大数据工作。E-mail: wangxuan@wfu.edu.cn

目前,关于海洋关键参数相关性的研究中,大多仅考虑两种或三种海气参数的相关性(Kahru等,2010;Uz和Yoder,2004)而未考虑到涡旋的调制作用,或仅研究AE、CE影响下两种海气参数的相关性(Gaube等,2014;Sun等,2016),并未涉及更多海洋关键参数全球分布以及针对涡旋外部(Out of eddy, OE)相关性的全面研究。而随着单体涡旋识别技术的实现,涡旋的研究也迈进一大步,能够更好的区分AE、CE以及OE区域,这使得相关系数的研究可以更为精细全面,因此本文利用2010年1月1日—2019年12月31日的多源遥感资料,通过涡旋识别、皮尔逊积距相关系数以及求取图像平滑度的方法研究全球中尺度涡内外海面温度异常(Sea surface temperature anomaly, SSTA)、海面高度异常(Sea Level Anomaly, SLA)、全球风速异常(Wind Speed Abnormal, WSA)与叶绿素异常(Chlorophyll Anomaly, CHLA)四种海洋关键参数相关性的时空分布特征,更为全面的探寻AE、CE调制下海表特征的相关性分布及其与OE区域的差异,为进一步厘清中尺度涡对海气环境的调制机制,改进海洋数值模拟提供理论依据。

2 数据和方法

2.1 数据

本文基于涡旋识别数据集,选取SLA、SSTA以及WSA和CHLA四种典型海洋关键参数,系统分析涡旋调制下的海表参数耦合特征。由于相关系数计算方法是基于各网格点的计算,因此需要数据集的空间分辨率统一为相同分辨率,本文将空间分辨率统一为 $1/4^\circ$,空间范围覆盖全球,时间分辨率为1天,时间跨度为2010年1月1日—2019年12月31日,具体数据信息见表1,各参数的年变化全球平均曲线见图1。

(1) 海表高度异常数据

本文使用Copernicus Marine and Environment Monitoring Service (CMEMS)提供的全球海洋网络L4级海面高度日数据(<https://marine.copernicus.eu/>)。该数据是融合Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, T/P, ENVISAT, GFO和ERS1/2高度计任务

产生的近实时产品。根据公式(1)可知去除长期年平均的SLA数据可视作SSH日数据处理,不会对相关性结果产生影响。因此可根据公式(1)得到无季节变化的SLA数据。

$$SLA(x,y,day) = \overline{SLA(x,y,day)} - \overline{SLA(x,y,month)} \quad (1)$$

其中 $SLA(x, y, day)$ 为每日海面温度, $\overline{SLA(x, y, month)}$ 为相应月的海面温度月平均。并对求得的SLA数据进行 $20^\circ \times 10^\circ$ 的二维高通滤波以突出涡旋信号并去除年度变化。

(2) 海表温度数据

本文使用National Centers for Environmental Information (NCEI)提供的 $1/4^\circ$ 每日最佳插值海面温度(OISST)v2.1版全球海表面温度日数据(<https://www.ncei.noaa.gov/products/optimum-interpolation-sst>)。该数据集以AVHRR辐射计为基础,结合现场船舶、浮标测量以及Argo数据校正偏差,通过插值得到的空间上完整的海面温度数据。我们利用SST日数据,根据公式(2)计算得到全球SSTA数据。

$$SSTA(x,y,day) = \overline{SST(x,y,day)} - \overline{SST(x,y,month)} \quad (2)$$

其中 $SST(x, y, day)$ 为每日海面温度, $\overline{SST(x, y, month)}$ 为相应月的海面温度月平均。并对求得的SSTA数据进行 $20^\circ \times 10^\circ$ 的二维高通滤波以突出涡旋信号并去除年度变化。

(3) 海表叶绿素数据

本文使用美国宇航局(NASA)提供的L3全球海洋叶绿素浓度日数据(<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>)。该数据主要来源于MODIS传感器,MODIS是Terra与Aqua卫星上的关键仪器,可获取36个光谱波段的数据。

为更直观的反应涡旋的调制作用以及统一分辨率计算相关系数,本文将原 4 km 分辨率每日CHL数据以及CHL月平均数据通过重采样的方式转换为 $1/4^\circ$ 分辨率的格网数据,并根据公式(3)来对叶绿素浓度进行以10为底的对数计算(Chelton等,2011),去除相应月的长期月平均得到相应的CHLA分布。

$$CHLA(x,y,day) = \lg[CHL(x,y,day)] - \lg[\overline{CHL(x,y,month)}] \quad (3)$$

其中, $CHL(x, y, day)$ 为每日叶绿素浓度, $\overline{CHL(x, y, month)}$ 为相应月的叶绿素月平均浓度。

并对求得的CHLA数据进行 $20^{\circ} \times 10^{\circ}$ 的二维高通滤波以突出涡旋信号并去除年度变化。

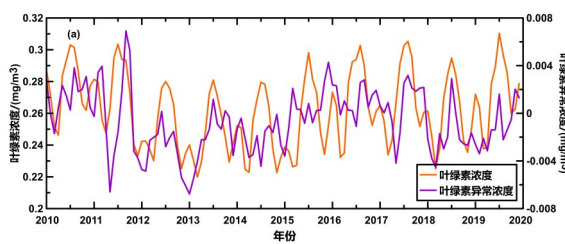
(4) 海表风速数据

本文使用Remote Sensing Systems提供的v7.0.1 WindSat数据产品中的全球海面10米高处的风速网格日数据 (<https://www.remss.com/measurements/>

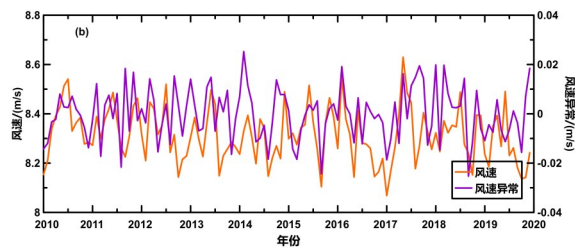
win d) 以及风速月平均数据。根据公式(4)计算得到全球WSA数据。

$$WSA(x,y,day) = WS(x,y,day) - \overline{WS(x,y,month)} \quad (4)$$

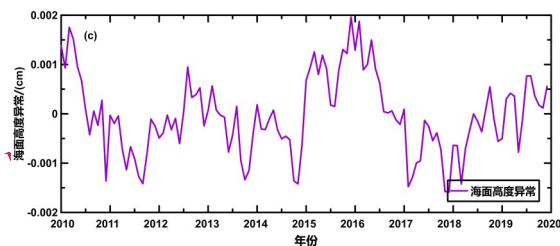
其中 $WS(x,y,day)$ 为每日风速， $\overline{WS(x,y,month)}$ 为相应月的风速月平均。并对求得的WSA数据进行 $20^{\circ} \times 10^{\circ}$ 的二维高通滤波以突出涡旋信号并去除年度变化。



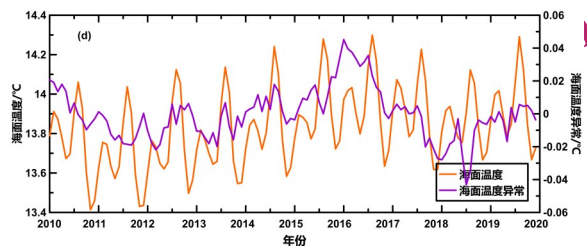
(a) 叶绿素浓度\叶绿素异常浓度时间序列
(a) the time series diagrams of CHL \ CHLA



(b) 风速\风速异常时间序列
(b) the time series diagrams of WS \ WSA



(c) 海面高度异常时间序列
(c) the time series diagrams of SLA



(d) 海面温度\海面温度异常时间序列
(d) the time series diagrams of SST \ SSTA

图1 各参数时间序列图

Figure. 1 Time series diagram of each parameter

2.2 涡旋识别算法

本文使用的中尺度涡识别方法是在Liu等(2016)研究的基础上，原理是假设涡旋的流线大致对应于封闭的SLA等高线，通过检索SLA的闭合等高线检索识别涡旋(Chelton等, 2011)。SLA闭合等高线应满足(1)位于水深大于200 m的区域(Cheng等, 2010); (2)振幅大于1 cm; (3)范围大于等于9像素点才会被识别为涡旋。

利用此方法，在2010年1月1日-2019年12月31日期间共识别到中尺度涡的个数约164.20万，其中AE约81.68万，CE约81.52万，其全球分布如图2所示(未进行寿命筛选)。

2.3 海表参数的相关系数计算方法

相关系数的计算按以下步骤进行。对2010年1月1日至2019年12月31日的每日识别的涡旋外

接矩形内的格点进行遍历，依据公式(5)计算每个格点所取的经纬度。

$$\begin{aligned} Lon &= min_lon + 0.25 * D_y \\ Lat &= min_lat + 0.25 * D_x \end{aligned} \quad (5)$$

其中， Lon 与 Lat 为此外接矩形内格点所取的经度以及纬度， min_lon 与 min_lat 为此涡旋边界中经度以及纬度的最小值， D_x 与 D_y 为此格点与外接矩形左下角格点经度以及纬度方向上的间隔。依据各格点所取经纬度判定是否此格点在涡旋内。分AE、CE提取当日在涡旋内部格点的CHLA、WSA、SSTA、SLA作为当日涡旋内海气参数数值，未被判定为在涡旋内格点的值记为当日涡旋外部参数数值。

将每个 $1/4^{\circ} \times 1/4^{\circ}$ 格点在2010年1月1日至2019年12月31日期间判定位于当日涡旋内(区分AE、CE)的相对应SSTA、SLA、WSA、CHLA数

值建立时间长度为10年的数据集，再进行11点滑动平均滤波（对无法进行11点滑动平均滤波的格点进行7点或5点滑动平均滤波）以去除噪声。对于每个格点，根据公式（6）计算两两参数的皮尔逊积矩相关系数，并将未通过P检验（95%显著性）的格点设置为0值。

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X\sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X\sigma_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

其中， X 、 Y 为参数， $\rho_{X,Y}$ 为 X 与 Y 的皮尔逊相关系数， $\text{cov}(X, Y)$ 为 X, Y 的协方差， $\sigma_X\sigma_Y$ 为 X 与 Y 的标准差。

对于涡旋外皮尔逊积矩相关系数的计算，采用与涡旋内部相关系数计算相同的方法，提取涡旋外海气参数值，建立数据集，进行滤波，根据公式（6）计算皮尔逊积矩相关系数，并将未通过P检验（95%显著性）的格点设置为0值。

2.4 平滑度计算方法

本文在张涛等人（2006）提出的自然图像平滑度的计算方法的基础上进行修改，首先将各参数之间的相关系数转换为0~255的范围内的值，使用5格点x5格点的窗口框选矩阵数据，记中心格点 (i, j) 转换后的相关系数为 $I(i, j)$ ，5格点x5格点窗口中其余格点转换后相关系数的均值为 $A(i, j)$ ，做差计算随机变量 $X(i, j)$ ，以0.05为间隔统计各段 X 的数量，以正态分布函数拟合 X 的概率密度函数 $f(x)$ ，根据公式（7）计算平滑度。

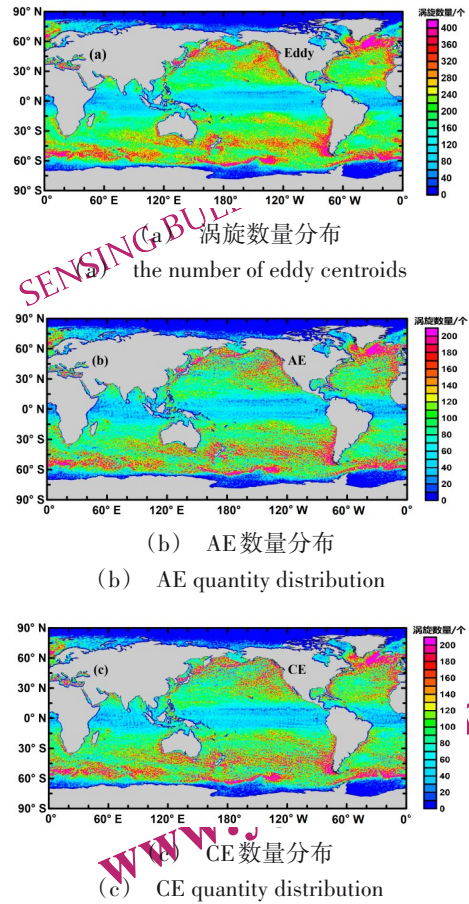


图2 2010-2019年全球涡旋数量统计
Figure 2 The global eddy quantity statistics during 2010 to 2019

$$M = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot x^2 dx \quad (7)$$

其中， $f(x)$ 为 X 的概率密度函数， M 为图像平滑度系数， M 越大则表面当前相关系数值偏离邻域相关系数值越剧烈，图像平滑度越差。

表1 分析中使用的多源遥感数据汇总

数据类型	SIA数据	SST数据	GHF数据	WS数据
来源	CMEMS	NCEI	NASA	RSS
版本	L4	V2.1	L3	v7.0.1 WindSat
时间	2010.01.01-2019.12.31	2010.01.01-2019.12.31	2010.01.01-2019.12.31	2010.01.01-2019.12.31
空间分辨率	1/4°	1/4°	4 km	1/4°
时间分辨率	1天	1天	1天	1天
网站	https://resources.marine.copernicus.eu/products	https://www.ncei.noaa.gov/products/optimum-interpolation-sst	https://oceansat.nasa.gov/	https://www.remss.com/measurements/wind/

3 结果与分析

3.1 涡旋调制下的海表参数相关性变化空间特征

3.1.1 海表高度异常

(1) 海表高度异常与温度异常为了解中尺度涡内外 SSTA 与 SLA 相互关系的空间分布, 本节分别做出 AE 与 CE 中以及 OE 中 SSTA 与 SLA 相关系数的空间分布图。图 3 (a-c) 分别为 AE、CE 与 OE 内 SSTA 与 SLA 的相关系数空间分布图。从图中可以看出 AE、CE、OE 中 SLA-SSTA 相关系数的空间分布趋势相似, 但是二者在 AE、CE 内的相关性显著强于 OE 内的相关性。在全球大部分区域, 二者表现为正相关, 在北美洲西岸、赤道太平洋区域、北印度洋地区、黑潮地区以及南极绕极流区域的正相关较全球其他区域更强。仅在赤道两侧的太平洋地区、澳大利亚西南地区、非洲西南部以及南北极附近, 二者表现为较为集中的负相关。从图 3 (d-f) 的纬带平均分布可以看出, 涡旋内外的总体趋势都是由两极的负相关系数向赤道地区递增, 逐渐转为正相关; 在南纬 45° 附近存在相关性极值, 达 0.5 左右, 在赤道相关性达到最大值 0.6 左右。从数值上看, 在 OE 中, 正相关系数普遍在 0.2~0.7 之间, 南半球高纬地区以及赤道太平洋东部地区最高在 0.8 左右, 南北极附近区域负相关在 -0.2 左右; 然而在 AE 以及 CE 中, 正相关普遍在 0.4~0.9 之间, 赤道太平洋以及北美洲西岸等地区正相关最高在 0.9 以上, 负相关地区相关系数在 -0.6 左右, 相关性明显强于 OE 中。

对于 SLA-SSTA 强相关性的分布模式我们认为很大程度上与洋流有关。洋流对海水盐度、流速以及压力等产生影响, 导致海水密度处于与海温线性程度较强的区间, 使得此处海面高度变化对于海水温度变化的响应更加强烈, 从而产生了这种相关性与洋流区域存在较大重合的分布模式。此外, 在 2010-2019 年期间, 拉尼娜-厄尔尼诺现象较强, 可能导致海水温度等参数变化异常, 使部分海域的海温处于与海面高度线性程度较高的区间内, 从而对西太暖池区域 SLA-SSTA 相关性较高的分布模式产生了贡献。

(2) 海表高度异常与叶绿素异常图 4 (a-c) 为 AE、CE、OE 内部的 CHLA 与 CHL 气候态的差

值 (以下简称为 CHLA 差值) 的全球分布, 从图中可以明显看出, AE 与 CE 中 CHLA 差值的浓度大部分在 $\pm 0.04 \text{ mg/m}^3$ 以上, 最高达 $\pm 0.1 \text{ mg/m}^3$, 而 OE 中大部分地区 CHLA 差值浓度在 $\pm 0.005 \text{ mg/m}^3$ 左右, AE 与 CE 中 CHLA 差值比 OE 中高出一个量级。AE 与 CE 中 CHLA 差值的分布相反, 且也体现出地域性特点。在澳大利亚西岸、赤道太平洋以及东南太平洋地区 CHLA 差值在 AE 中表现为较大范围的正值, CE 中则表现为负值; 在黑潮、加利福尼亚寒流区、中印度洋等地区 CHLA 差值在 AE 中表现为较高的负值, CE 中为较高的正值。可以看出, AE 与 CE 较 OE 中 CHLA 特征更丰富, 涡旋对于 CHL 的调制作用明显。图 4 (d-f) 为 AE、CE 以及 OE 的 CHLA 与 SLA 相关系数的空间分布图。由图可见, CHLA 与 SLA 的相关性表现出较强的地域性特征, 且 AE 与 CE 中的相关性总体强于 OE 中的相关性。从图中可以看出, 在东南太平洋地区、澳大利亚西岸地区、巴西海盆以及安德列斯暖流地区正相关分布最为集中, 且正相关性较高。其他区域如北太平洋暖流区, 南美洲南岸也存在区域性的正相关集中, 但相关程度较低。在北印度洋、赤道太平洋西部、黑潮地区、加利福尼亚寒流区以及智利海岭地区存在较大范围的负相关。从相关性数值上看, OE 中相关性大部分在 -0.3~0.3 之间, AE 与 CE 中相关性大部分都在 ± 0.4 以上, OE 中负相关最强在北印度洋以及赤道太平洋西部地区, 相关系数在 -0.7 左右, 正相关在东南太平洋以及澳大利亚西岸最强, 相关系数在 0.4 左右。而 AE 与 CE 中, 北印度洋地区负相关性大部分在 -0.9 以上, 东南太平洋地区、澳大利亚西岸正相关性最强在 0.8 左右, 明显强于 OE 中相关性。

在澳大利亚西岸, 对比 AE 与 CE 中相关系数的分布可以看出, 在澳大利亚西岸存在较大范围的正相关, 且 AE 中正相关程度普遍较 CE 中高, 分布范围较 CE 中更广。Gaube 等 (2013) 曾对该区域进行研究, 认为近岸的 AE 生成时优先携带高浓度叶绿素的近岸海水, 远离利文流区域的 AE 与 CE 生成时优先将较高和较低的 CHL 带入其中。另外, 叶绿素变化与埃克曼泵强度在此处存在很强的正相关关系, 海表温度场及表面流诱导的最大的埃克曼泵主要出现在 AE 中, 是维持此处 AE 中高水平 CHL 的原因。因此认为埃克曼泵的调控是

维持图4 (d-e) 中的澳大利亚西岸较高正相关性的原因, 且因为埃克曼泵在AE中更强, AE形成

时携带的叶绿素较高的水体, 因此造成了AE中正相关性更强, 范围更大的现象。

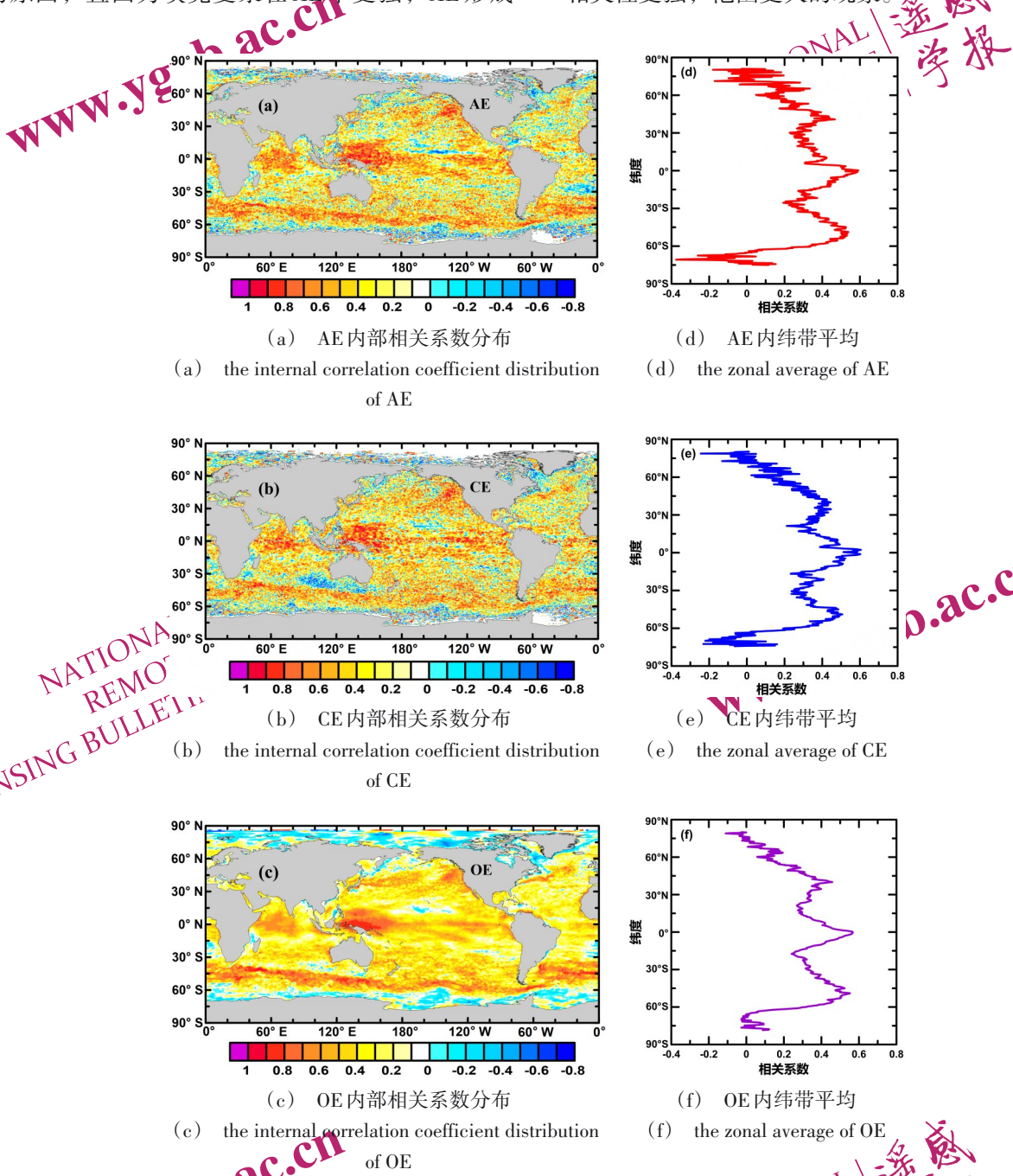


图3 SLA-SSTA与流速相关系数的全球网格分布以及纬带平均(图中0值区域代表未通过95%显著性检验的海区)
Figure 3 Global grid distribution and zonal average of SLA-SSTA Pearson correlation coefficients (the 0 value area in the figure represents the sea area that fails to pass the 95% significance test)

在印度洋北部地区, 可以明显看出CE中负相关性比AE中要高0.2左右。Gaube等(2014)认为涡旋能够增强上升流与下降流, 此过程的垂直速度预计与涡旋振幅近似成线性比例。表2为北印度洋AE、CE的基本属性统计。在2010年1月1日至2019年12月31日期间, 选取5°S-20°S, 50°E-90°

E范围, 共识别到12795个AE, 176427个CE。AE与CE的平均半径分别为77.53 km和81.13km, AE的平均振幅为2.22 cm, CE平均振幅为2.98 cm, CE的平均振幅约为AE的1.34倍。表2中可以看出在印度洋北部, CE的平均振幅以及平均半径都高于AE, 因此猜想, 北印度洋地区CE中SLA与

CHLA 负相关性更高的原因是此处 CE 的规模以及振幅更大, CE 产生的涡旋垂直泵送比 AE 中更强, 能够将更多的叶绿素带入海表, 因此此处 CE 中负相关性更强。

在北美洲西南海域, CE 中负相关为-0.6左右, AE 中大部分区域负相关较低, 甚至存在正相关。Ni 等人 (2021) 针对异常涡旋 (表面冷核反气旋涡和暖核气旋涡) 进行研究, 结果表明此处的 AE 中包含异常涡旋比例远超 CE 中异常涡旋的含量, 因此我们认为此处 AE 中异常涡旋的比例较高, 使得此处 AE 中 CHLA 较高, 导致此处 AE 中负相关较低, 甚至出现正相关情况。而 CE 中正常涡旋的比例较高, 使得此处的相关性表现为较强的负相关。

(3) 海表高度异常与风速异常本节主要探讨在不同性质涡旋影响下, WSA 与 SLA 之间的相关性。图 5 (a-c) 为 AE、CE 以及 OE 内 WSA 与 SLA 相关系数的全球分布图, 对比 (a) (b) (c) 三图可以看出, 三者的分布趋势基本一致, 全球来说正负相关性夹杂, 地域性特征表现较明显, 在黑潮地区, 赤道太平洋东部、墨西哥暖流区以及南纬 45° 海域表现为大范围的正相关。在赤道太平洋西部负相关性明显。从图 5 (d-f) 的纬带平均来看, 涡旋内外的趋势也是相同的, 相关系数从高纬地区向赤道先增大后降低, 在南北纬 45° 左右正相关存在极值, 赤道地区综合表现为负相关纬带分布。从相关系数的数值来看, OE 中相关系数基本在-0.2~0.2 之间, 赤道太平洋东部正相关性最强在 0.6 左右, 西部负相关在-0.6 左右, 而 AE 与 CE 中相关系数基本在-0.5~0.5 之间, 赤道太平洋地区正相关与负相关最强在 0.7 与-0.8 左右, 能够明显看出 AE 与 CE 中相关性比 OE 中更强。

3.1.2 海表温度异常

本节为探讨不同性质涡旋的影响下, SSTA 与 CHLA、WSA 相关性的分布, 分别计算了 SSTA 与 CHLA、WSA 相关系数的分布作为评估相关性大小的依据。图 6 (a-c) 分别为 AE、CE 与 OE 中 SSTA 与 CHLA 的相关系数全球分布图。对比三幅图可以看出, 相关系数在涡旋内外的分布趋势大致相同。在南纬 45°~北纬 45° 海域大部分地区表现为负相关。在赤道太平洋西部、日本暖流区以及北印度洋海域负相关分布最广也最强; 另外, 在马尾藻

海域以及大西洋中部地区, 也表现为大范围的负相关, 相关程度仅次于北印度洋地区。正相关主要分布在南北纬 45° 以上的海域, 在 45° 以下地区正相关的分布则比较零散, 主要分布在太平洋低纬地区、中大西洋海岭以及澳大利亚西部海域等地。虽然涡旋内外分布趋势相同, 但是涡旋内部的相关系数明显高于 OE 中的相关系数。OE 中负相关大部分在-0.2 左右, 赤道地区与北印度洋地区最强在-0.6 左右, 正相关大部分在 0.2 左右。然而在 AE 以及 CE 中, 负相关大部分在-0.6 左右, 且有较大海域负相关达-0.9 以上; 正相关则大部分呈现出 0.4 左右的正相关。可以看出在涡旋调制下, 无论是 AE 还是 CE, 其中的相关系数都比 OE 中高出 0.2 以上。在 SSTA 与 WSA 的相关性分布中也有相同的规律, 图 6 (d-f) 为 AE、CE、OE 中 SSTA 与 WSA 相关系数分布图。对比三幅图可以看出, 相关系数的全球分布趋势一致, 但是 AE 以及 CE 内的相关性要略高于 OE 内。从图中可以明显看出, 涡旋内外 SSTA-WSA 相关性在全球大部分地区呈现出负相关, 在太平洋中部与北印度洋地区负相关性最强, 在赤道太平洋东部表现为较强的正相关。在相关性的程度上也明显表现出 AE 与 CE 内的相关性略强于 OE 内的相关性。OE 中相关性大部分在-0.3 左右, 太平洋中部地区负相关性最强在-0.5 左右, 正相关在 0.1~0.7 之间。但是 AE 以及 CE 中, 相关性大部分在-0.6 左右, 太平洋中部达-0.7 以上, 正相关则在 0.4~0.9 之间, 涡旋内高于涡旋外的趋势表现较为明显。

对于全球大部分区域 WSA-SSTA 的相关性表现为负, 仅赤道太平洋东部地区表现为正相关的分布模式, Kahru (2010) 认为这是由于风速的增加诱导较冷的深层水上涌并加快蒸发, 使得海表面温度降低, 造成 WSA-SSTA 在全球大部分地区是负相关关系。

3.1.3 叶绿素异常与海面风速异常相关性

本节主要讨论 AE、CE 影响下, CHLA 与 WSA 相关系数的空间分布, 图 7 (a) (b)、(c) 分别为 AE、CE 以及 OE 内 CHLA 与 WSA 的全球相关系数分布图。由图可知, AE、CE、OE 分布大致趋势一致, 但是 AE、CE 内的相关性要明显强于 OE 内的相关性。在全球范围内, 30° 以下地区表现正相关居多, 30° 以上地区则负相关性较多。在低纬地

区,太平洋西部地区与北印度洋地区正相关程度最高,且分布最为集中。负相关在赤道太平洋东部表现最强,呈线状分布。另外在北大西洋分布较为集中,负相关性表现较强。从图7(d-f)中AE、CE与OE的纬带平均来看,相关系数都是由两极向低纬度地区先降低后升高,赤道地区有所降低。在南北纬 30° 左右转变为正相关。虽然在涡旋调制下,相关系数分布的大致趋势相同,但是涡旋内,相关系数的数值明显高于OE。这种差别在赤道太平洋地区表现最为明显,在OE中,此处正相关性最高在0.4左右,负相关性最强在-0.4左右,而在AE以及CE中,此处正相关性达0.6左右,负相关则在-0.6左右。从全球其他地区也可以看出,OE中正相关大部分在0.2左右,负相关在-0.3左右,涡内正相关则普遍在0.4左右,负相关在-0.4左右,都呈现出涡旋内高于涡旋外的趋势。

Kahru (2010) 曾研究过全球风与叶绿素的相关性,提出在全球CHLA-WSA正相关的地区混合层较浅,增加的风很容易加深混合层并将额外的营养物质带入上层海洋,因此表现为正相关;冬季混合层较深的区域风速增加将浮游植物从透光带中吹出,造成负相关。而在赤道地区则较为复杂,负相关可能是由向东传播的开尔文波动力学引起的,导致混合层在高风速条件下变浅,而产生负相关。

(M为图像平滑度系数, M越大平滑性越差)

3.2 中尺度涡内外相关性特征对比分析

对比图3-7的涡旋内外相关性分布图可以明显发现,OE的相关系数明显低于AE、CE中的相关系数,在全球范围内,大部分地区涡旋内部相关性比涡旋外部相关性高0.2以上,如CHLA-SSTA以及CHLA-SLA的相关性分布对于这种特征表现异常明显。OE中CHLA-SSTA与WSA-CHLA的相关性大致在 ± 0.2 , AE与CE中相关性 ± 0.6 ;在相关性表现最强的区域,涡旋内外差别可达0.5以上,如CHLA-SSTA的赤道太平洋西部,OE中负相关在0.3左右,而AE与CE此处相关性达0.8左右,对比异常明显。另外,OE中正(负)相关出现时一般表现为较大范围的连续正(负)相关。如在SLA-CHLA相关性分布中澳大利亚西岸出现的正相关,占据 $15^{\circ}\text{S}-30^{\circ}\text{S}$, $80^{\circ}\text{E}-120^{\circ}\text{E}$ 的广阔海域且

分布连续不夹杂负相关区域,而在AE、CE中此处出现的正相关,更类似于涡旋而引起的相关性较高的点相连成的正相关较密集区域,分布模式并不连续,正相关聚集区域中也包含负相关的小区域。而且,OE中相关系数的分布相比于AE以及CE中相关系数分布明显更加平滑,表3为根据公式(7)计算得各参数之间相关系数的平滑度,从表中可以看出,AE与CE的平滑度在200以上,明显高于OE中15左右的平滑度。而且从各相关系数的纬带平均分布中也能够看出,OE的纬带平均明显比AE以及CE中的纬带平均变化更加流畅,曲折更少。可以得出结论,AE与CE图像的平滑性较OE更差。此外,在OE中正负相关之间过渡存在渐变过程,如SSTA-CHLA相关系数分布图中,从澳大利亚西岸到印度洋中部,可以明显的看出由较高的正相关到相关系数基本为零到相关系数为负的变化过程,但是在AE、CE中,正负相关性存在跳跃式变化,点状分布特性明显。从澳大利亚西岸到印度洋中部,由较强的正相关极快的转变为负相关,过渡区域极小。由此可见,涡旋对于海洋遥感参数的调制作用在相关性方面表现明显。

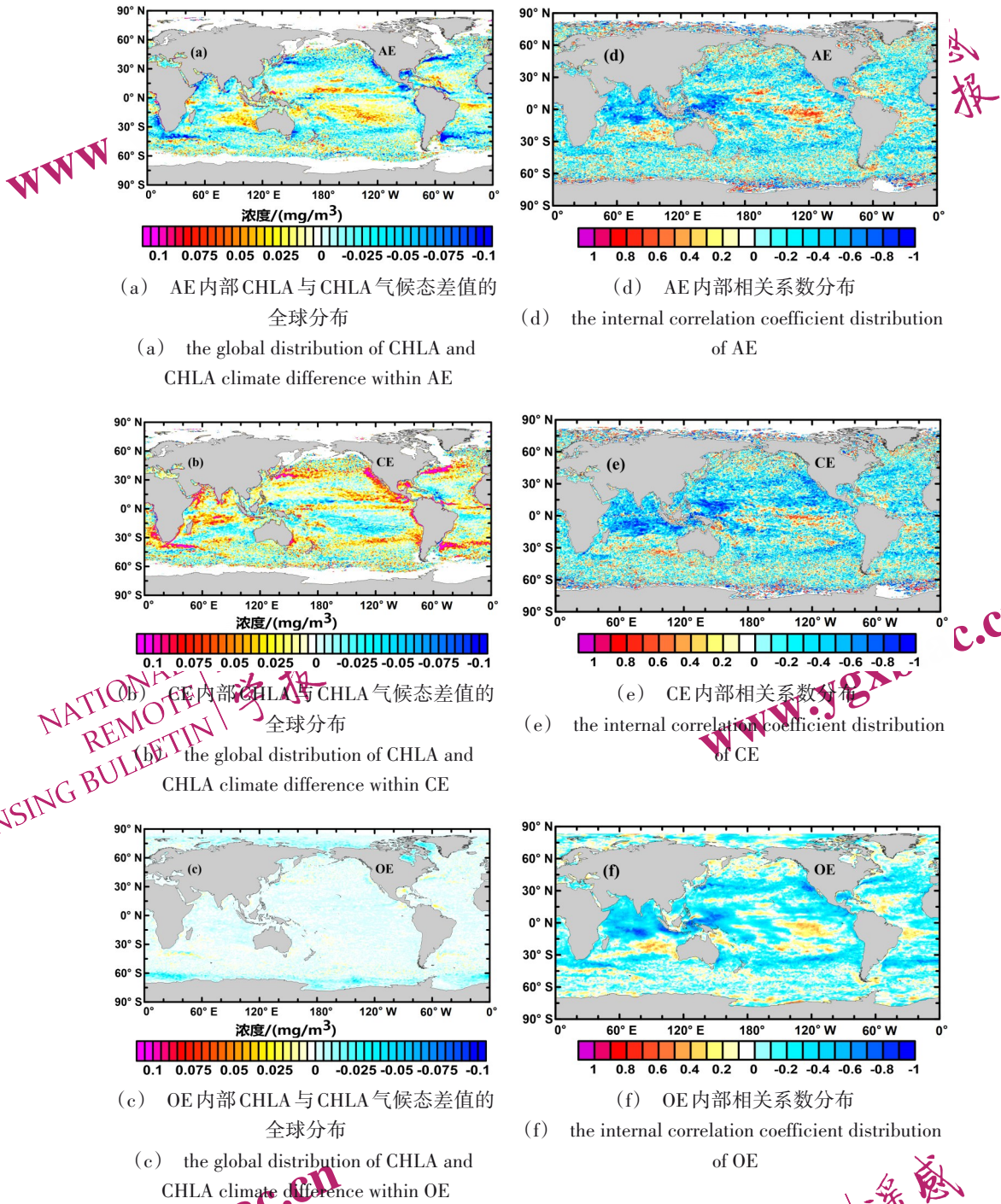


图4 CHLA气候态差值分布以及CHLA-SSTA皮尔逊相关系数的全球格网分布(图中0值区域代表未通过95%显著性检验的海区)

Figure 4 Global grid distribution of CHLA climate difference and CHLA-SSTA Pearson correlation coefficient (the 0 value area in the figure represents the sea area that fails to pass the 95% significance test)

表2 印度洋北部涡旋参数统计

Table 2 Statistics of eddy parameters in the northern Indian Ocean

	AE	CE
数量(个)	172795	176427
平均振幅(cm)	2.22	2.98
平均半径(km)	77.53	81.13

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报

www.ygxb.ac.cn

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报

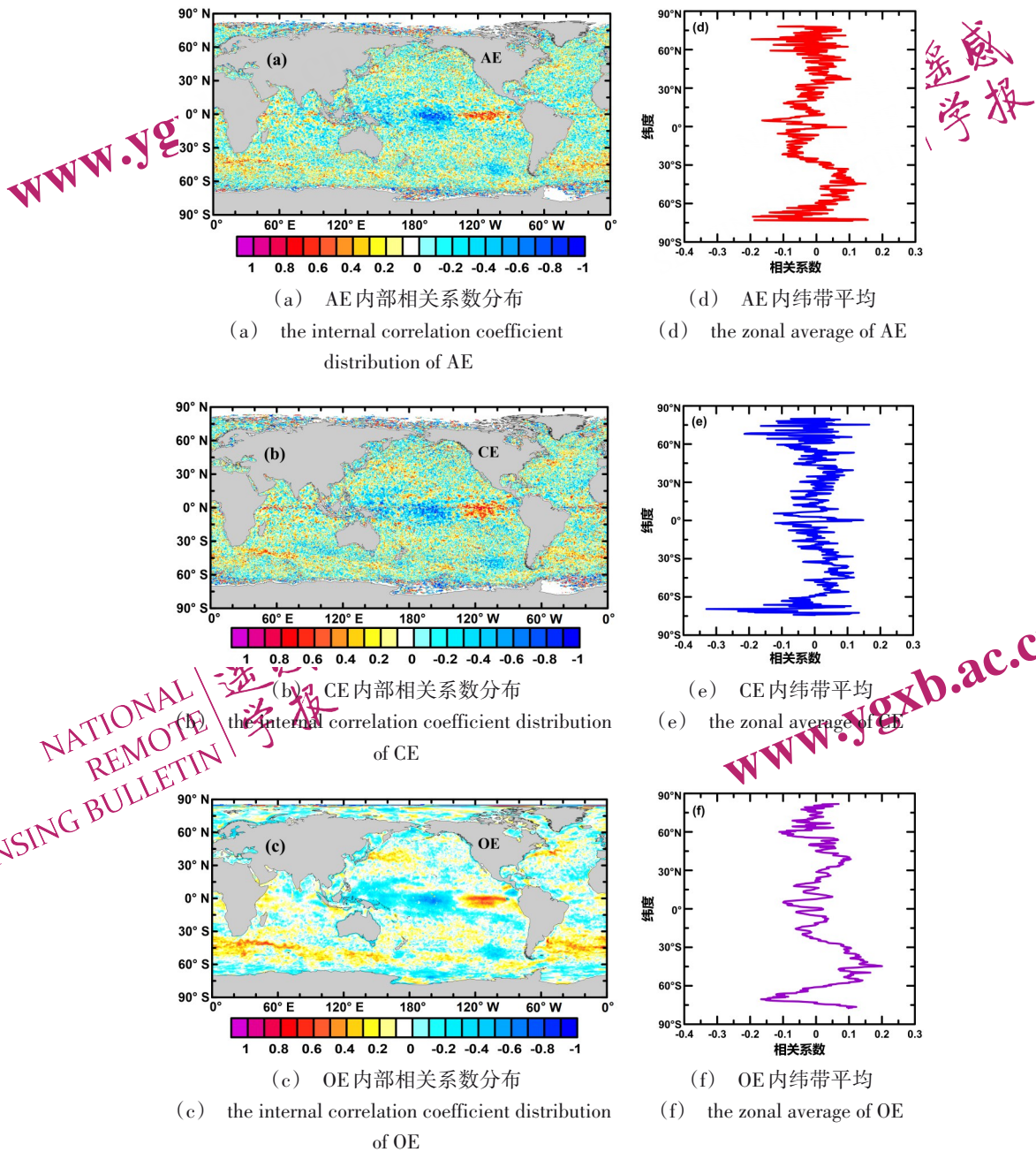


图5 SLA-WSA 皮尔逊相关系数的全球分布及其1/4°纬带平均(图中0值区域代表未通过95%显著性检验的海区)
Figure 5 Global distribution of Pearson correlation coefficient of SLA-WSA and its 1/4° zonal average (the 0 value area in the figure represents the sea area that fails to pass the 95% significance test)

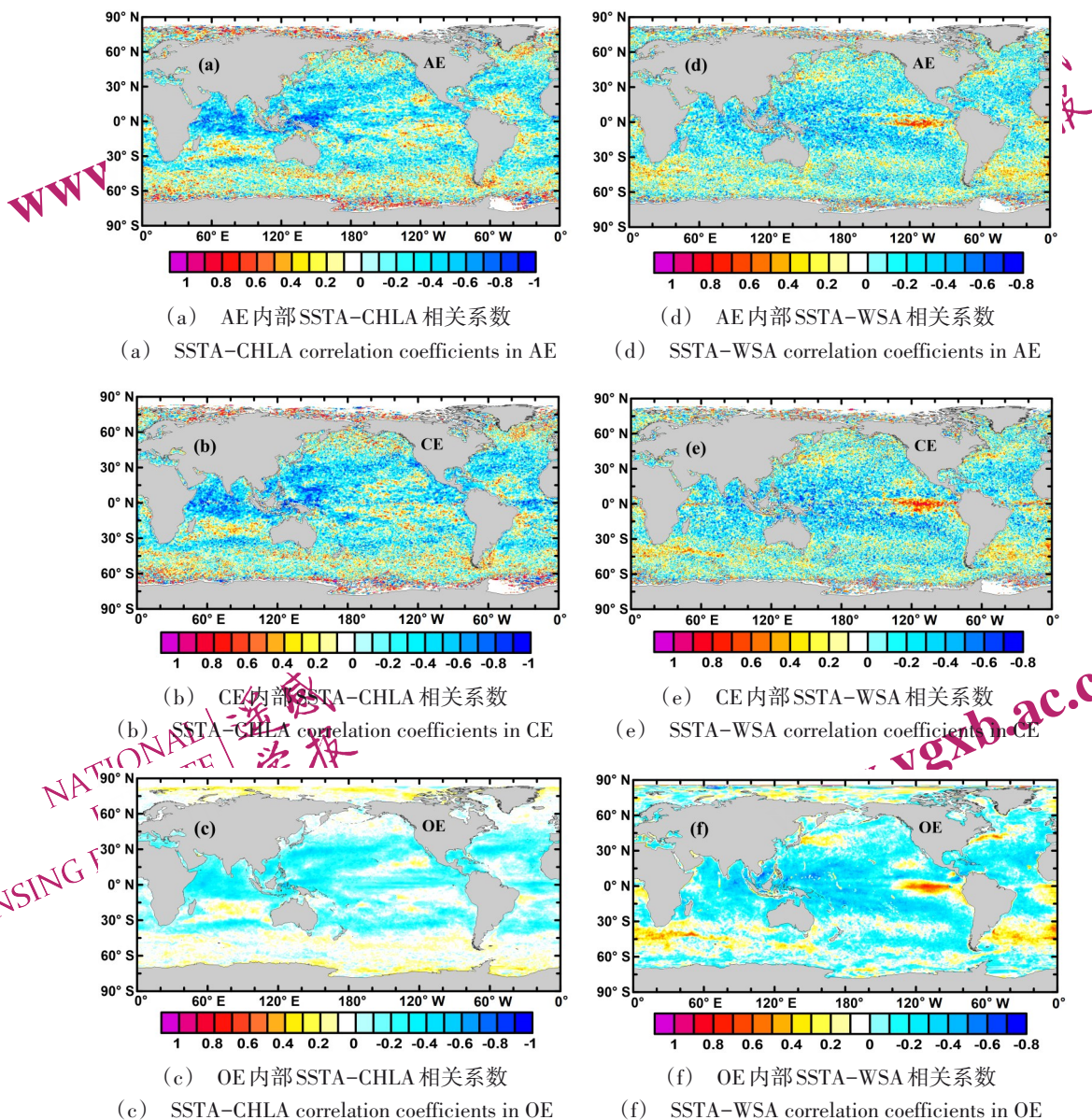


图6 SSTA-CHLA与SSTA-WSA皮尔逊相关系数的全球格网分布(图中0值区域代表未通过95%显著性检验的海区)
 Figure 6 Global grid distribution of SSTA-CHLA and SSTA-WSA Pearson correlation coefficients (the 0 value area in the figure represents the sea area that fails to pass the 95% significance test)

表3 相关系数空间分布平滑度
 Table 3 Smoothness of spatial distribution of correlation coefficient

相关系数	M(越大平滑性越差)		
	AE	CE	OE
SLA-CHLA	469.3	611.9	31.7
SSTA-CHLA	418.3	554.1	19.2
WSA-CHLA	1142.6	1601.4	17.5
SLA-SSTA	262.9	343.4	10.8
WSA-SLA	697.2	953.4	17.2
WSA-SSTA	545.4	761.2	12.9

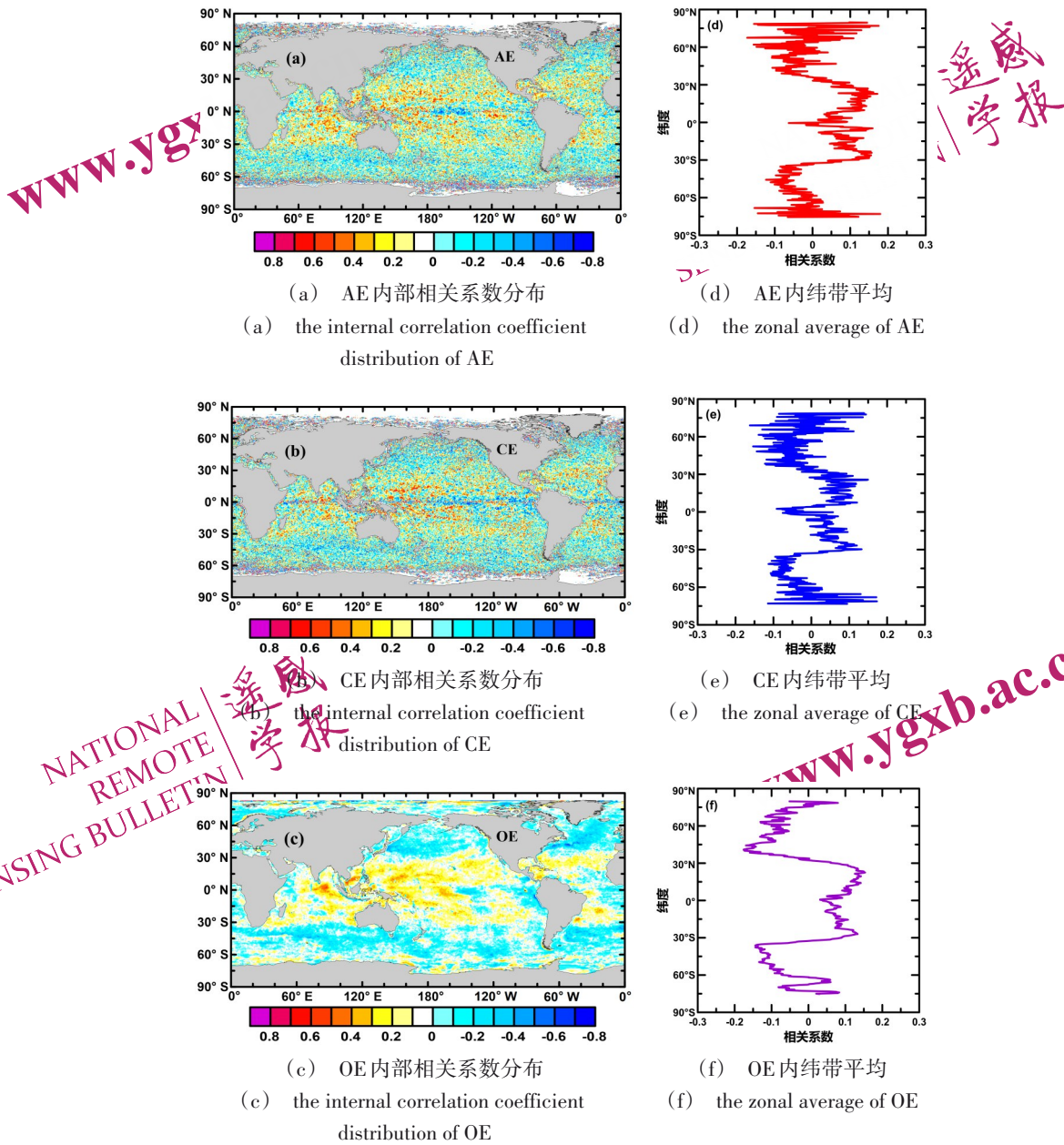


图7 CHLA-WSA皮尔逊相关系数的全球分布及其1/4°纬带平均(图中0值区域代表未通过95%显著性检验的海区)
Figure. 7 Global distribution of Pearson correlation coefficient of CHLA-WSA and its 1/4° zonal average(the 0 value area in the figure represents the sea area that fails to pass the 95% significance test)

4 结论

本文利用2010年1月1日-2019年12月31日全球涡旋识别数据, 并利用RSS的WS, NOAA的SST、CMEMS的SLA资料以及MODIS的CHL浓度资料, 分析了全球海洋中尺度涡内外SSTA、WSA、SLA以及CHLA四种海洋关键参数两两之间相关性的全球分布特征。可以明显看出中尺度涡对各参数的相关程度、相关系数分布以及整体平滑度有明显影响, 各参数的相关性分布表现出不

同的地域特征。详细结论如下:

- (1) AE、CE以及OE中SLA-CHLA的相关系数以及SSTA-CHLA的相关系数在赤道太平洋西部与北印度洋地区都表现为较强的负相关, 在澳大利亚西岸、巴西海盆以及东太平洋海丘地区正相关性较强。从全球来看, CHLA-SSTA相关性分布纬带性较强, CHLA-SSTA南北纬45°到赤道地区表现为负相关性偏多, 南北纬45°到两极地区正相关较强。
- (2) AE、CE中WSA-SSTA、WSA-SLA的相

关系数在赤道东部达 0.8 左右, 表现为强烈正相关, 在赤道西部则表现为显著的负相关。而 WSA-CHLA 在赤道的相关系数则表现为东负西正。从全球来看 SLA-SSTA 大部分地区表现为正, WSA-SSTA 表现为负, WSA-CHLA 低纬为正, SLA-WSA 则正负混杂。

(3) 从涡旋内外来看, AE、CE 相比 OE, 虽然相关性的分布区域没有较大改变, 但相关性显著增强。且 OE 中相关系数的分布明显更为平滑, 正(负)相关性出现时一般表现为较大范围的正(负)相关, 且相关性相反两区域之间过渡明显。而涡旋中相关性分布更加粗糙, 相关性极值区域小且多以散点表现, 正负区域之间过渡区域极小。

参考文献 (References)

- Chelton D B, Gaube P, Schlax M G, Early J J and Samelson R M. 2011. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll. *Science*, 334(6054): 328-332 [DOI: 10.1126/science.1208897]
- Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M and Szoek R A. 2007. Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters*, 34(15) [DOI:10.1029/2007GL030812]
- Chelton D B, Schlax M G and Samelson R M. 2011. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, 91(2): 167-216 [DOI:10.1016/j.pocean.2011.01.002]
- Chen G and Han G Y. 2019. Contrasting short-lived with long-lived mesoscale eddies in the global ocean. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 124(10): 3149 - 3167 [DOI: 10.1029/2019JC014983]
- Chen G, Yang J, Tian F L, Chen S G, Zhao C F, Tang J W, Liu Y J, Wang Y N, Yuan Z H, He Q and Cao C C. 2021. Remote sensing of oceanic eddies: Progresses and challenges. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 302-322 (陈戈, 杨杰, 田丰林, 陈树果, 赵朝方, 唐军武, 刘颖洁, 王祎诺, 苑忠浩, 何遭, 曹川川. 2021. 海洋涡旋遥感: 进展与挑战. *遥感学报*, 25(1): 302-322 [DOI: 10.11834/jrs.20210400])
- Chen X Y, Li H T, Cao C C and Chen G. 2021. Eddy-induced pycnocline depth displacement over the global ocean. *Journal of Marine Systems*, 221(C11): 103577 [DOI: 10.1016/j.jmarsys. 2021. 103577]
- Cheng X H and Qi Y Q. 2010. Variations of eddy kinetic energy in the south china sea. *Journal of Oceanography*, 66(1), 85-94 [10.1007/s10872-010-0007-y]
- Ferrari R and Wunsch C. 2010. The distribution of eddy kinetic and potential energies in the global ocean. *Tellus A*, 62(1): 92 - 108 [DOI:10.1111/j.1600-0870.2009.00432.x]
- Frenger I, Gruber N, Knutti R and Münnich M. 2013. Imprint of southern ocean eddies on winds, clouds and rainfall. *Nature Geoscience*, 6(8): 608-612 [DOI:10.1038/ngeo1863]
- Gaube P, Chelton D B, Strutton P G and Behrenfeld M J. 2013. Satellite observations of chlorophyll, phytoplankton biomass, and Ekman pumping in nonlinear mesoscale eddies. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 118(12): 6349-6370 [DOI: 10.1002/2013JC009027]
- Gaube P, McGillicuddy D J, Chelton D B, Behrenfeld M J and Strutton P G. 2014. Regional variations in the influence of mesoscale eddies on near-surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(12): 8195 - 8220 [DOI: 10.1002/2014JC010111]
- Kahru M, Gille S T, Murtugudde R, Strutton P G, Manzano-Sarabia M, Wang H L and Mitchell B G. 2010. Global correlations between winds and ocean chlorophyll. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12040) [DOI:10.1029/2010JC006500]
- Klein P and Lapeyre G. 2009. The oceanic vertical pump induced by mesoscale and submesoscale turbulence. *Annual Review of Marine Science*, 1(1): 351-75 [DOI:10.1146/annurev.marine.010908.163704]
- Liu Y J, Chen G, Sun M, Liu S and Tian F L. 2016. A Parallel SLA-Based Algorithm for Global Mesoscale Eddy Identification. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(12): 2743-2754 [10.1175/JTECH-D-16-0033.1]
- Liu Y J, Tian F L and Chen G. 2020. Statistical characterization of sea surface temperature over mesoscale eddies in the South China Sea. *Periodical of Ocean University of China*, 50(5): 146-156 (刘颖洁, 田丰林, 陈戈. 2020. 南海中尺度涡旋海表温度特征统计研究. *中国海洋大学学报*, 50(5): 146-156 [DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20190070])
- Ni Q B, Zhai X M, Jiang X M and Chen D K. 2021. Abundant Cold Anticyclonic Eddies and Warm Cyclonic Eddies in the Global Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 51(9): 2793 - 2806 [DOI:10.1175/JPO-D-21-0010.1]
- Park J E, Park K A, Kang C K and Park Y J. 2020. Short-term response of chlorophyll-a concentration to change in sea surface wind field over mesoscale eddy. *Estuaries and Coasts*, 43(3): 646-660 [DOI:10.1007/s12237-019-00643-w]
- Siegel D A, Peterson P, McGillicuddy D J, Maritorena S and Nelson N B. 2011. Bio-optical footprints created by mesoscale eddies in the sargasso sea. *Geophysical Research Letters*, 38(13) [DOI:10.1029/2011GL047660]
- Sun B W, Liu C Y and Wang F. 2019. Eddy induced SST variation and heat transport in the western north Pacific ocean. *Journal of Oceanology and Limnology*, 38(1): 1-15 [DOI: 10.1007/s00343-019-8255-1]
- Sun S W, Fang Y, Liu B C and Tana. 2016. Coupling between SST and wind speed over mesoscale eddies in the south china sea. *Ocean Dynamics*, 66(11): 1467-4174 [DOI:10.1007/s10236-016-0993-4]
- Uz B M and Yoder J A. 2004. High frequency and mesoscale variability in seawifs chlorophyll imagery and its relation to other remotely sensed oceanographic variables. *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*, 51(10-11): 1001-1017 [DOI: 10.

- 1016/j.dsr2.2004.03.003]
- Zhang T, Ping X J, Xu C Y. 2006. Detection Algorithm for Spatial LSB Embedding Based on Image Smoothness. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 18(10): 1607-1612 (张涛, 平西建, 徐长勇. 2006. 基于图像平滑度的空域lsb嵌入的检测算法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 18(10): 1607-1612 [10.1321/j.issn:1003-9775.2006.10.025])
- Zhao D D, Xu Y S, Zhang X G and Huang C. 2021. Global chlorophyll distribution induced by mesoscale eddies. *Remote Sensing of Environment*, 254(6): 112245 [DOI:10.1016/j.rse.2020.112245]
- Zheng X L, Dong Q and Fan X. 2020. Characteristics of sea surface temperature and Chlorophyll concentration inside mesoscale eddies in the North Pacific Ocean. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 24(1): 85-96 (郑晓莉, 董庆, 樊星. 2020. 北太平洋中尺度涡海表温度和叶绿素浓度特征分析. *遥感学报*, 24(1): 85-98 [DOI:10.11834/j.issn.10208215])

Correlation analysis of the sea-surface features under eddy modulation in the global ocean using remote sensing data

HUANG Chunming¹, CHEN Xiaoyan¹, WANG Xuan^{1,3*}, CHEN Ge^{1,2}

1. School of Marine Technology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China;

3. School of Physics and Optoelectronics Engineering, Weifang University, Weifang 261061, China

Abstract: Mesoscale eddies are broadly distributed in the global ocean and have significant effects on the sea surface temperature (SST), sea surface height (SSH), chlorophyll (Chl), wind speed (WS), and other ocean parameters. Therefore, the coupling analysis of mesoscale eddies and ocean key parameters is an important part of ocean research. With the realization of individual eddy identification technology, the anti-cyclonic eddy (AE), cyclonic eddy (CE), and outside eddy (OE) can be better distinguished. This enables us to comprehensively study the distribution and difference of correlation of sea surface features by comparing OE with AE and CE, which provides a theoretical basis for further clarifying the modulation mechanism of the mesoscale eddy on the air-sea interface and improving ocean numerical simulation. On the basis of distinguishing AE, CE, and OE, this study calculated the Pearson correlation coefficient using sea surface temperature anomaly (SSDA), sea level anomaly (SLA), chlorophyll anomaly (CHLA), and wind speed abnormal (WSA) data from 2010 to 2019, and compared the smoothness of the correlation coefficient. The results show that the correlation distribution among the parameters has significant regional characteristics. In CE and AE, the correlation is ± 0.5 in most areas of the ocean, and ± 0.7 in the Northern Indian Ocean and the Equatorial Pacific. In OE, the correlation is ± 0.2 in most regions, and ± 0.4 in the Northern Indian Ocean and the Equatorial Pacific. In addition, when a positive (negative) correlation occurs in OE, it generally shows a large range of positive (negative) correlation, and there is a noticeable transition region between the two. However, under the influence of eddy, the extreme correlation regions are smaller and mainly present as scattered points, and the transition regions between positive and negative regions are very narrow. In terms of smoothness, the smoothness coefficient of the correlation coefficient of each parameter in OE is about 15, while the smoothness coefficient of AE and CE is about 450, which is much lower than that in OE area. We conclude that the influence of eddy on the correlation of each parameter is mainly reflected in the value, distribution and smoothness of the correlation coefficient. The correlation coefficient of each parameter in OE is about 0.2 lower than that in CE and AE, and the smoothness of the correlation coefficient in OE is about 30 times of that in AE and CE. The distribution of the correlation also has a strong point feature in the original distribution mode due to the modulation of the eddy.

Key words: Remote sensing observation, mesoscale eddy, coupling analysis, sea surface temperature, sea surface height, chlorophyll concentration, wind speed

Supported by Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42106192), the International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals (CBAS2022GSP01) and the China Postdoctoral Science Foundation project (No.2021M693018).