

# 北太平洋中尺度涡海表温度和叶绿素浓度特征分析

郑晓莉<sup>1,2</sup>, 董庆<sup>1</sup>, 樊星<sup>1</sup>

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 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 AVISO 卫星高度计资料识别并追踪了北太平洋 2007 年—2012 年的中尺度涡, 并利用 OSTIA 的海表温度 SST(Sea Surface Temperature)资料与 MODIS 的叶绿素 a 浓度(Chl-a)资料, 研究了北太平洋 2007 年—2012 年中尺度涡 SST 和 Chl-a 浓度的时空分布特征, 并分析北太平洋典型中尺度涡 SST 与 Chl-a 浓度的变化特征, 主要结论如下: 本文共识别出 992 个中尺度涡, 其中 442 个气旋涡, 550 个反气旋涡。中尺度涡 SST 时空分布特征为: 气旋涡温度强度( $I_{CE}$ )月变化特征比反气旋涡温度强度( $I_{AE}$ )更强。 $I_{CE}$  年际变化显著,  $I_{AE}$  则不明显。温度强度较强的气旋涡和反气旋涡集中分布在黑潮延伸区。中尺度涡 Chl-a 浓度时空分布特征如下: 气旋涡和反气旋涡 Chl-a 浓度月变化特征明显, 且二者的变化趋势一致; 年际变化则均不明显。Chl-a 浓度值高的中尺度涡主要分布在高纬海域。中尺度涡 SST 与海洋动力参数(振幅、涡度和涡动能(EKE))的相互关系为: 反气旋涡 SST 与振幅的相关性亦正亦负, 且在空间上均匀分布。气旋涡 SST 与振幅的负相关系数主要分布在黑潮延伸区。正相关性强的反气旋涡多于气旋涡。反气旋涡 SST 与涡度的相关性亦正亦负, 气旋涡 SST 与涡度呈负相关。反气旋涡 SST 与 EKE 的相关性亦正亦负; 气旋涡的相关性为正。中尺度涡 Chl-a 浓度与海洋动力参数的相互关系为: 反气旋涡 Chl-a 浓度与振幅的相关性为正, 且在空间上均匀分布; 气旋涡在黑潮延伸区与阿拉斯加湾呈正相关。反气旋涡和气旋涡 Chl-a 浓度与涡度均呈正相关。反气旋涡 Chl-a 浓度与 EKE 呈正相关; 气旋涡 Chl-a 浓度与 EKE 相关性亦正亦负。

**关键词:** 遥感, 叶绿素浓度, 海表温度, 温度强度, 中尺度涡, 北太平洋

**引用格式:** 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

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[DOI: 10.11834/jrs.20208215]

## 1 引言

海洋中尺度涡对海域的温盐结构、流速分布、营养盐输运等有重要影响(Parker, 1971; Richardson, 1980; Robinson 等, 1983)。中尺度涡使水体垂向混合加强, 水体不稳定性增加, 提高了底层营养盐的向上输运能力, 使上层营养盐得到有效补充, 在一定程度上提高了海洋初级生产力水平(Garcon 等, 2001; Martin 和 Pondaven, 2003)。光照、海水温度和营养盐是影响海洋浮游植物的重要因素, 决定了浮游植物的分布及其变化特征。叶绿素浓度是海洋初级生产力特征的直

接反映。迄今为止, 海洋中尺度现象与海洋生物化学过程间相互作用的研究在全球陆架浅海和大洋均有所开展, 并持续取得突破性进展, 是一项具有科学意义和应用价值的研究方向。

海洋中尺度涡在改变局地流速分布的同时亦引起局地温盐结构和生态环境的变化。气旋涡可提高初级生产力(Falkowski 等, 1991; Bibby 等, 2008; Xiu 和 Chai, 2011; Gaube 等, 2013), 反气旋涡则相反(Xiu 和 Chai, 2011; Gaube 等, 2013)。进一步研究表明, 气旋涡内部的上升流和 Ekman 抽吸作用是涡旋内部叶绿素浓度升高的重要因素(Benitez-Nelson 等, 2007; Bibby 等, 2008)。Siegel

收稿日期: 2018-05-15; 预印本: 2018-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41876210,41476154); 国家重点研发计划(编号:2017YFA0603003)

第一作者简介: 郑晓莉, 1990年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋遥感。E-mail: zhengxl@radi.ac.cn

通信作者简介: 董庆, 1965年生, 男, 研究员, 研究方向为海洋过程的遥感监测。E-mail: dongqing@radi.ac.cn

等(2008)通过追踪一个气旋涡和一个反气旋涡验证了涡旋的上升流、对流和Ekman抽吸作用均对中尺度涡的叶绿素浓度有所贡献。中尺度过程对叶绿素浓度的影响作用具有区域性特征(Gaube等, 2013)在开阔外海对海区的生产力有提高作用,但在近岸海域以上结论并不完全适用(Gruber等, 2011)。在大部分边界流区,气旋涡加强叶绿素浓度异常变化,反气旋涡减弱叶绿素浓度异常变化(Gaube等, 2013, 2014)。而在高生产力的东边界流上升流系,中尺度涡对海区生产力起到抑制作用,而在贫营养盐海区,中尺度涡通过提高限制性营养盐的向上净通量来显著提高海区的生产力(Gruber等, 2011)。Chelton等(2011b)通过分析10年的卫星高度计资料和上层叶绿素浓度资料发现中尺度涡对叶绿素浓度分布的影响显著,因此需要重新评估SSH(Sea Surface Height)和叶绿素浓度的协变性机制,当时间尺度大于2—3周时,由中尺度涡旋转速度形成的平流运动是诱发叶绿素浓度平流运动的主要机制。Gaube等(2014)通过进一步研究得出中尺度涡影响浮游植物种群分布是平流、卷挟、上升流/下降流等几种机制共同作用的结果,并具有区域差别性;而叶绿素浓度对中尺度涡的响应机制也是由一种或多种因素共同作用的结果。

北太平洋是中尺度涡较为活跃的海区之一,是全球大气和海洋变化的敏感区域。中国位于北太平洋西岸,气候和近海海洋环境受西北太平洋热带气旋和洋流变化的直接影响。因此研究北太平洋的中尺度涡对生态环境的影响具有重要的科学意义和应用价值。本文利用多源遥感资料研究北太平洋2007年—2012年中尺度涡SST和Chl-a浓度的时空分布特征,并分析北太平洋典型中尺度涡的SST与Chl-a浓度的演化特征。为进一步研究海洋中尺度涡SST与叶绿素浓度之间的相互关系以及中尺度涡对海域生态过程的响应机制奠定基础。

## 2 数据和方法

### 2.1 数据

本文利用卫星高度计资料、海表温度资料和叶绿素浓度资料3种卫星资料,数据时长统一取为2007-01-01—2012-12-31,空间范围为 $100^{\circ}\text{E}$ —

$77^{\circ}\text{W}$ ,  $0^{\circ}$ — $65^{\circ}\text{N}$ 。

(1)卫星高度计资料。采用AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)的海面高度异常SLA(Sea Level Anomaly)资料(<http://www.Aviso.oceanobs.com/en/data.html>[2018-05-15])。该资料由TOPEX/Poseidon(T/P), Jason-1和ERS1/2等高度计数据融合而成,并对其进行了潮汐、逆气压和电磁偏向校正(Qiu和Chen, 2010)。该数据时间分辨率为7 d,空间分辨率为 $(1/3)^{\circ}\times(1/3)^{\circ}$ 。

(2)海表温度资料。SST(Sea Surface Temperature)数据来自OSTIA(Operational SST & Sea Ice Analysis)产品([http://ghrsstppmetoffice.com/pages/latest\\_analysis/ostia.htm](http://ghrsstppmetoffice.com/pages/latest_analysis/ostia.htm)[2018-05-15]),分辨率为 $(1/20)^{\circ}\times(1/20)^{\circ}$ 的日数据。该产品使用了AVHRR、AMSR、AATSR等传感器的数据以及实测数据。为消除白天海表升温带来的误差,OSTIA产品的基本温度滤除了白天风速小于6 m/s的观测值。不仅如此,该产品参考了AATSR数据和卫星跟踪浮标数据来调整误差。该产品可提供均方根误差(RMSE)小于 $0.6^{\circ}\text{C}$ 的高分辨率的SST数据(Donlon等, 2012)。

(3)叶绿素浓度资料。叶绿素数据来自NASA的MODIS传感器提供的叶绿素aChl-a(Chlorophyll-a concentration)浓度数据(<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>[2018-05-15])。本文使用来自MODIS的TERRA/AQUA二级叶绿素数据,空间分辨率均为 $(1/12)^{\circ}\times(1/12)^{\circ}$ ,时间分辨率为1 d。为提高数据覆盖度,将每天的TERRA和AQUA的Chl-a浓度数据进行融合,并以SLA数据的日期为中心,对融合的数据做前后3 d(共7 d)平均,而后将7 d平均数据的空间分辨率降到 $(1/3)^{\circ}\times(1/3)^{\circ}$ ,同SLA数据,对处理好的数据进行空间插值,得到北太平洋全覆盖的Chl-a浓度产品。

### 2.2 中尺度涡的识别和追踪方法

本文采用的中尺度涡识别法是秦丽娟等(2015)基于Chelton等(2011a)提出的基于SSH的中尺度涡自动识别算法,该算法简单易行且准确度高,本文的方法根据研究区的特点作了适当改进,具体步骤如图1。

其中,规定图1中指定阈值在赤道处为1200 km,  $25^{\circ}\text{N}$ 以北处为400 km,在 $0^{\circ}$ — $25^{\circ}\text{N}$ 间此值与纬度呈线性关系(Chelton等, 2011a)。

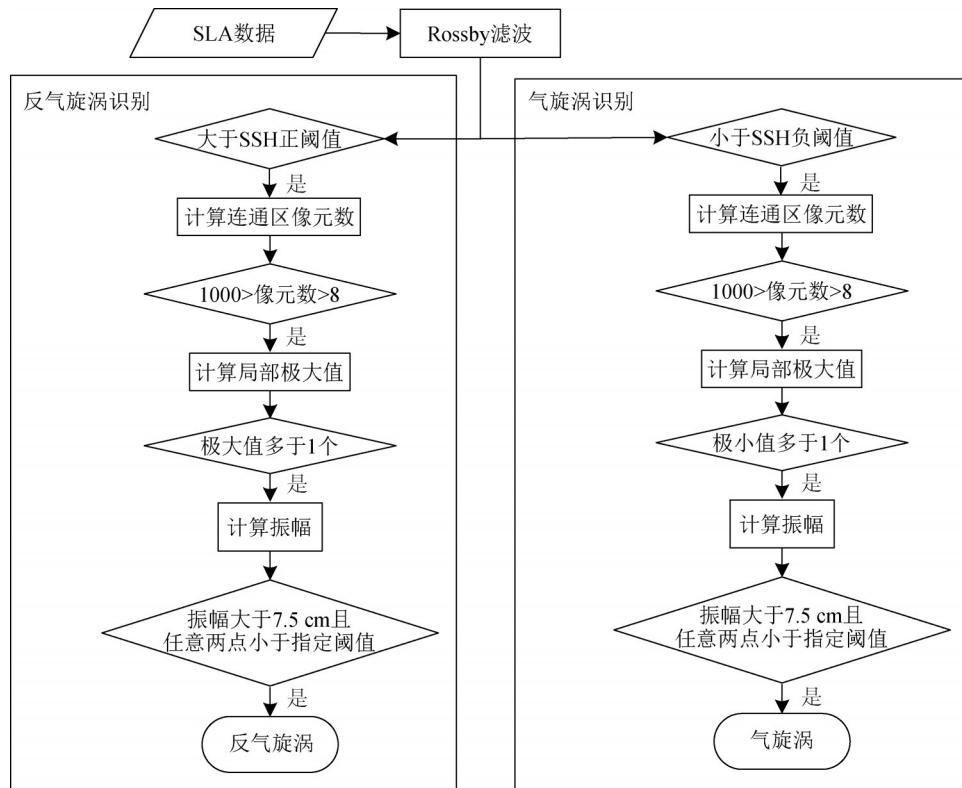


图1 中尺度涡识别流程图

Fig.1 Algorithm of extraction mesoscale eddies

采用最近距离法与相似性法相结合的追踪算法对每一时刻全部中尺度涡进行追踪(秦丽娟等, 2015), 具体步骤如下:

(1)将 $t$ 时刻涡旋边界范围内的几何图形(被检测到涡旋范围的最外沿)的质心定义为涡的中心点。

(2)以中心点为原点, 向西取以斜压长 Rossby 波相速度 $7$  d内在局地传播距离的 $1.75$ 倍长度(不足 $150$  km 情况下则取为 $150$  km), 其余 $3$ 个方向均取为 $150$  km, 在此范围内选择相似性值最小且满足相似性值小于 $0.5$ 的涡。相似性计算如下

$$I = \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \zeta}{\zeta_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta EKE}{EKE_0}\right)^2} \quad (1)$$

式中,  $\Delta S(S_0)$ ,  $\Delta R(R_0)$ ,  $\Delta \zeta(\zeta_0)$ 和  $\Delta EKE(EKE_0)$ 分别表示两个涡旋(典型涡旋)之间的空间距离、半径之差、相对涡度之差与涡动能之差; Chaigneau 等(2008)设置的  $S_0$ ,  $R_0$ ,  $\zeta_0$ 和  $EKE_0$ 分别为  $100$  km,  $500$  km,  $10^{-6}\text{s}^{-1}$ 和  $100 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ 。

(3)若 $t+1$ 时刻未能搜索到同源涡旋, 则继续向下一时刻重复步骤(2)和步骤(3)。

(4)若能追踪到, 则视为该涡旋继续存在; 如未能追踪到, 则视为该涡旋消失, 涡旋的生命周

期终止于 $t$ 时刻。

(5)涡旋至少被追踪到 $4$ 个时刻。

### 3 结果

#### 3.1 温度强度的时空分布特征

本文在 $2007$ 年— $2012$ 年间共追踪到中尺度涡 $992$ 个, 其中气旋涡 $442$ 个, 反气旋涡 $550$ 个。中尺度涡内的 SST 分布可以反映中尺度涡对海洋热力环境的响应。为了反映涡旋内部 SST 变化程度, 本文引入涡旋“温度强度”的概念, 定义为涡旋边缘平均温度与涡旋中心温度之差的绝对值。温度强度为

$$I = |T_{\text{center}} - T_{\text{edge}}| \quad (2)$$

式中,  $I$ 代表温度强度,  $T_{\text{center}}$ 代表涡旋中心温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{\text{center}}$ 取涡旋中心及离其距离最近的 $4$ 个点的平均值,  $T_{\text{edge}}$ 代表涡旋边缘平均温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

为探讨中尺度涡 SST 在不同时间尺度上的变化特征, 本节按月、年与年内 $3$ 个时间尺度进行分析。图2(a)为反气旋涡与气旋涡的温度强度逐月分布图。如图2所示, 气旋涡温度强度( $I_{\text{CE}}$ )表现出很强的月变化特征, 上半年(平均为 $2.87$   $^{\circ}\text{C}$ )明显高于

下半年(平均为  $1.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。  $I_{\text{CE}}$  最大值  $3.51\text{ }^{\circ}\text{C}$  出现在3月, 最小值  $1.08\text{ }^{\circ}\text{C}$  出现在10月, 均值为  $2.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。反气旋涡温度强度( $I_{\text{AE}}$ )的变化趋势小于  $I_{\text{CE}}$ , 最大值  $2.45\text{ }^{\circ}\text{C}$  出现在12月, 最小值  $1.49\text{ }^{\circ}\text{C}$  出现在8月,  $I_{\text{AE}}$  均值为  $1.94\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

$I_{\text{AE}}$  上半年无明显变化, 下半年中在8月达到全年最低值, 8—10月  $I_{\text{AE}}$  逐渐升高, 10—12月  $I_{\text{AE}}$  先降低后升高。比较反气旋涡和气旋涡变化可知, 上半年,  $I_{\text{CE}}$  要明显高于  $I_{\text{AE}}$ ; 下半年,  $I_{\text{AE}}$  高于  $I_{\text{CE}}$ 。图2(b)为  $I_{\text{CE}}$  和  $I_{\text{AE}}$  的年度分布图。如图所示,  $I_{\text{CE}}$  年际变化显著,  $I_{\text{AE}}$  则变化不明显。  $I_{\text{CE}}$  最大值  $3.06\text{ }^{\circ}\text{C}$

出现在2008年, 此时  $I_{\text{CE}}$  与  $I_{\text{AE}}$  差异最大, 前者高于后者  $1.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。  $I_{\text{CE}}$  最小值  $1.35\text{ }^{\circ}\text{C}$  出现在2012年, 且此时  $I_{\text{AE}}$  与  $I_{\text{CE}}$  差异最大为  $0.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。  $I_{\text{AE}}$  最大值  $2.13\text{ }^{\circ}\text{C}$  出现在2012年, 最小值  $1.49\text{ }^{\circ}\text{C}$  出现在2008年。在2008年,  $I_{\text{CE}}$  出现最大值时,  $I_{\text{AE}}$  刚好出现最小值; 而在2012年,  $I_{\text{CE}}$  出现最小值时,  $I_{\text{AE}}$  出现最大值。2010年  $I_{\text{CE}}$  和  $I_{\text{AE}}$  分别为  $1.91\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $1.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 近似相等。2008年和2012年无 ENSO 事件发生, 此时  $I_{\text{CE}}$  与  $I_{\text{AE}}$  分别达到最大值; 而2010年为 ENSO 冷事件, 此时  $I_{\text{CE}}$  与  $I_{\text{AE}}$  几乎相同。由此可见, 中尺度涡温度强度的年际变化与 ENSO 无关。

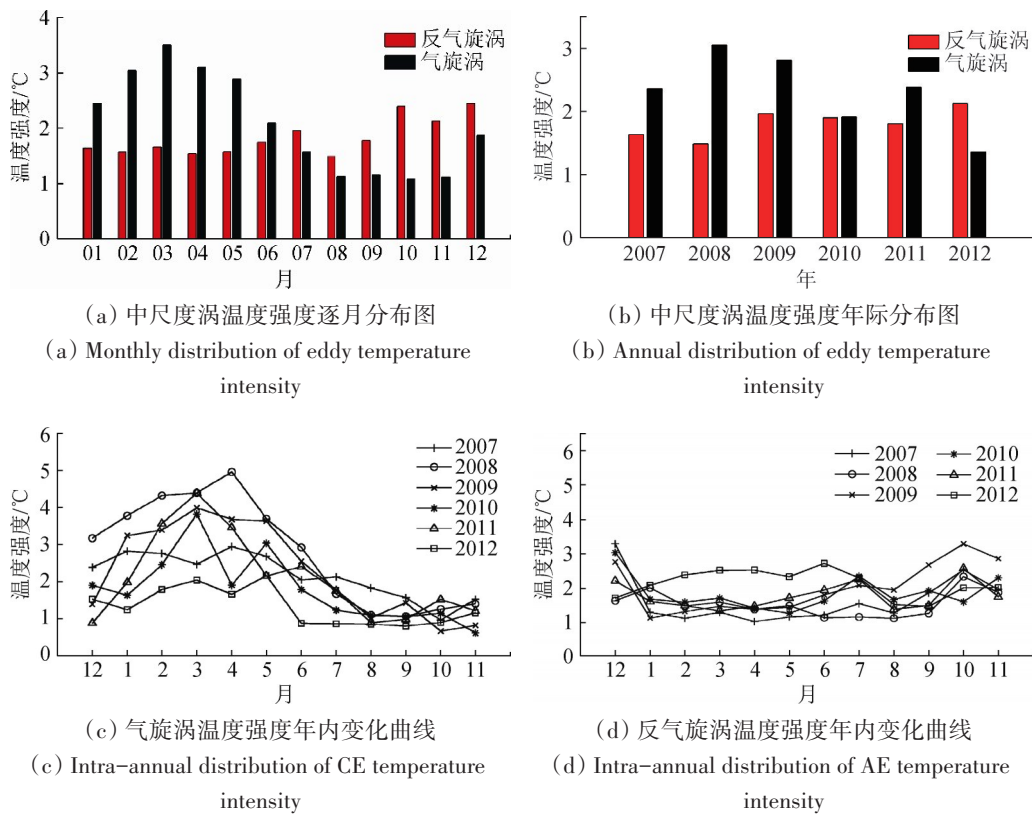


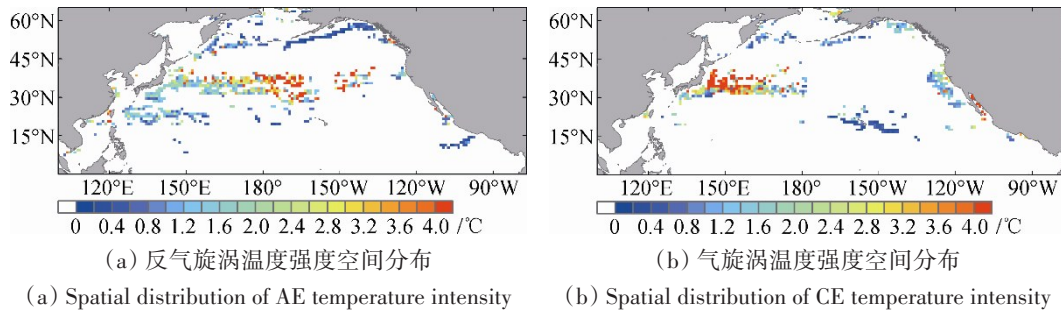
图2 北太平洋2007年—2012年中尺度涡温度强度时间变化特征

Fig.2 Variations of temperature intensity inside eddy in the NPO from 2007 to 2012

此外, 本节还讨论了中尺度涡温度强度年内变化特征。图2(c)和图2(d)给出了  $I_{\text{CE}}$  和  $I_{\text{AE}}$  的年内变化曲线。如图2(c),  $I_{\text{CE}}$  冬季到春季过渡的过程中逐渐升高, 夏季到秋季则明显降低。如图2(d),  $I_{\text{AE}}$  大体趋势是下半年强于上半年, 且全年的年际差异不明显。对比图2(c)与图2(d),  $I_{\text{CE}}$  年内变化幅度大于  $I_{\text{AE}}$ 。

图3为北太平洋2007年—2012年中尺度涡温

度强度  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  网格空间分布。如图3(a)所示, 较强的  $I_{\text{AE}}$  主要分布在黑潮延伸区东侧, 此外, 阿拉斯加湾的  $I_{\text{AE}}$  极弱, 亲潮区域和副热带逆流区西侧的  $I_{\text{AE}}$  较强。温度强度较强的气旋涡(图3(b))主要分布在黑潮延伸区的西侧。加利福尼亚外海的  $I_{\text{CE}}$  也较强。在阿拉斯加湾,  $I_{\text{CE}}$  比  $I_{\text{AE}}$  强, 且反气旋涡的生成范围比气旋涡广。副热带逆流区西侧几乎没有气旋涡, 东侧的  $I_{\text{AE}}$  和  $I_{\text{CE}}$  都很弱。

图3 北太平洋2007年—2012年中尺度涡温度强度 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格空间分布图Fig.3 Spatial distribution of eddy temperature intensity over  $1^\circ \times 1^\circ$  in the NPO from 2007 to 2012

### 3.2 北太平洋中尺度涡叶绿素 a 浓度时空分布特征

为探讨中尺度涡 Chl-a 浓度(中尺度涡内 Chl-a 浓度均值)在不同时间尺度上的变化特征,本节按月、年与年内3个时间尺度进行分析。图4(a)为气旋涡与反气旋涡 Chl-a 浓度的逐月分布图。由图可见,气旋涡的 Chl-a 浓度表现出很强的月变化特征,全年有两个峰值,分别出现在5月和9月。气旋涡的 Chl-a 浓度最大值  $0.492 \text{ mg/m}^3$ , 出现在5月;最小值  $0.074 \text{ mg/m}^3$ , 出现在12月。反气旋涡的 Chl-a 浓度全年也有两个峰值,也出现在5月和9月。反气旋涡的 Chl-a 浓度最大值  $0.422 \text{ mg/m}^3$ , 出现在5月;最小值  $0.098 \text{ mg/m}^3$ , 出现在12月。且气旋涡和反气旋涡 Chl-a 浓度的变化趋势一致。纵观全年,对比气旋涡与反气旋涡,1月气旋涡与反气旋涡 Chl-a 浓度几乎相同;由于气旋涡引起的上升流为贫营养盐海域的浮游植物带来生长所需要的营养盐,2—8月气旋涡的 Chl-a 浓度高于反气旋涡;9—12月反气旋涡的 Chl-a 浓度高于气旋涡的 Chl-a 浓度,其可能原因为9月之后,海面平均水温低,北太平洋反气旋涡水温高于周边水体的平均水温,有利于浮游植物生长,因此反气旋涡初级生产力高于周边水体的平均初级生产力,Chl-a 浓度高于周边水体的平均 Chl-a 浓度(丛丕福, 2006)。图4(b)为气旋涡与反气旋涡的 Chl-a 浓度年际分布图。如图4所示,气旋涡与反气旋涡的 Chl-a 浓度年际变化均不明显,且从2007年—2009年呈下降趋势,2009年—2011年呈上升趋势,2012年则再次降低。气旋涡 Chl-a 浓度最大值  $0.258 \text{ mg/m}^3$  出现在2007年,最小值  $0.204 \text{ mg/m}^3$  出现在2009年,均值为  $0.231 \text{ mg/m}^3$ 。反气旋涡的

Chl-a 浓度最大值  $0.250 \text{ mg/m}^3$  出现在2010年,最小值  $0.204 \text{ mg/m}^3$  出现在2009年,均值为  $0.225 \text{ mg/m}^3$ 。在2007年、2008年和2011年,气旋涡 Chl-a 浓度高于反气旋涡。而在2010年和2012年,气旋涡 Chl-a 浓度则低于反气旋涡。在2009年二者持平。图4(c)和(d)给出了气旋涡与反气旋涡 Chl-a 浓度的年内变化曲线。气旋涡与反气旋涡 Chl-a 浓度由冬季到春季呈稳定上升趋势,秋季到冬季大体呈下降趋势。相较于气旋涡 Chl-a 浓度的年内变化趋势,反气旋涡 Chl-a 浓度年与年之间差别更小。Maúre 等(2017)利用2002年—2011年卫星 Chl-a 数据研究日本海中尺度涡对春季浮游植物爆发时间的影响,结果表明中尺度涡叶绿素浓度最大值出现在4月,而本文最大值则出现在5月。产生这种差异的原因可能是日本海为温带水域,在水华爆发之前营养盐不受限制(Yamada 等, 2004),而本文研究区多位于贫营养海区,涡旋可以通过碳水化合物的上升或垂直混合来缓解透光区营养盐限制(Bibby 等, 2008; Dufois 等, 2016; Sukigara 等, 2014)。

图5为北太平洋2007年—2012年中尺度涡 Chl-a 浓度 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格空间分布。由图5可见,Chl-a 浓度值高的气旋涡和反气旋涡主要分布在高纬海区。图5(a)显示,亲潮和阿拉斯加湾的反气旋涡 Chl-a 浓度最高,副热带逆流区与黑潮延伸区东侧的反气旋涡 Chl-a 浓度最低,黑潮延伸区西侧与加利福尼亚阿外海的反气旋涡 Chl-a 浓度较高。Chl-a 浓度较强的气旋涡(图5(b))主要分布在阿拉斯加湾、亲潮区和黑潮延伸区西侧。夏威夷海区分布的气旋涡 Chl-a 浓度偏低。

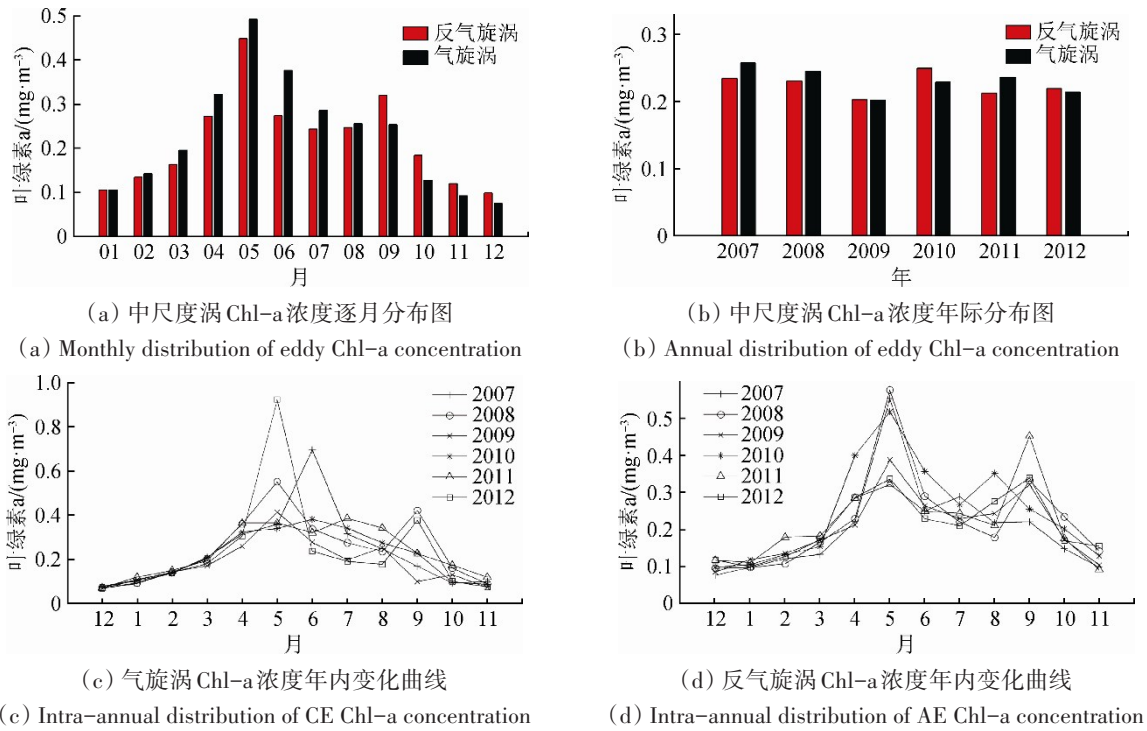


图4 北太平洋2007年—2012年中尺度涡 Chl-a 浓度时间变化特征  
Fig.4 Variations of Chl-a concentration of eddy in the NPO from 2007 to 2012

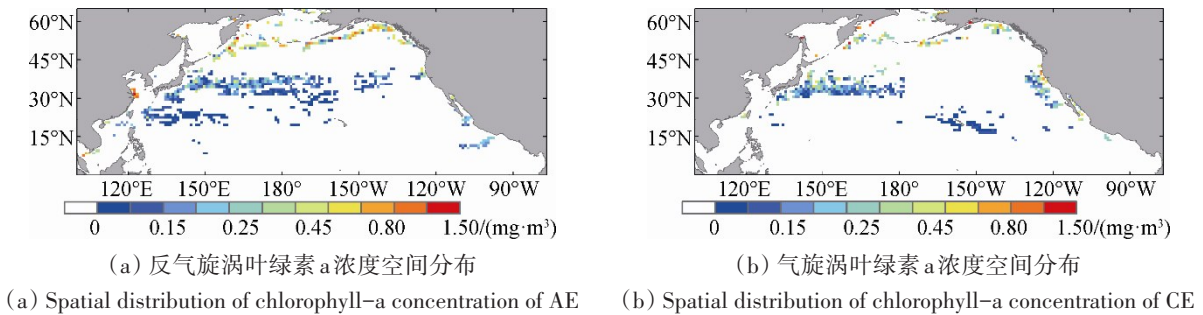


图5 北太平洋2007年—2012年中尺度涡叶绿素 a 浓度 1°×1° 网格空间分布图  
Fig.5 Spatial distribution of eddy chlorophyll-a concentration over 1°×1° in the NPO from 2007 to 2012

3.3 温度与海洋动力参数的空间关系

为进一步了解中尺度涡 SST 和 Chl-a 浓度及其与海洋动力环境的相互联系，分别分析 SST 和 Chl-a 浓度与海洋动力参数(振幅、涡度和 EKE)相关系数的空间分布情况。振幅计算公式如下

$$A = SLA_{center} - \overline{SLA_{edge}} \quad (3)$$

式中， $A$  代表振幅， $SLA_{center}$  为涡旋中心 SLA 的值， $\overline{SLA_{edge}}$  为涡旋边缘 SLA 的平均值，在北半球，反气旋涡的振幅为正值，气旋涡的振幅为负值。

涡度计算公式为

$$vor \approx \frac{8 \cdot g \cdot f}{f \cdot R} \quad (4)$$

式中， $vor$  为涡度， $g$  为重力加速度， $f$  为科氏参数，

$R$  为涡旋半径。

科式参数计算公式为

$$f = 2 \cdot \omega \cdot \sin\varphi \quad (5)$$

式中， $\omega$  为地转自转角速度， $\varphi$  为地理纬度。

EKE 计算公式为

$$EKE = \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \quad (6)$$

式中， $u$  和  $v$  分别为地转流速的北分量和东分量。 $u$  和  $v$  的公式如下

$$\begin{cases} u = -\frac{g}{f} \frac{\partial SLA}{\partial y} \\ v = \frac{g}{f} \frac{\partial SLA}{\partial x} \end{cases} \quad (7)$$

为了解中尺度涡 SST 与涡度、振幅和 EKE 之

间相互关系的空间分布, 分别作出气旋涡和反气旋涡及其与涡度、振幅和EKE的相关系数的空间分布图。图6为北太平洋2007年—2012年中尺度涡SST与涡旋振幅、涡度和EKE的相关系数 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格空间分布图, 为了便于分析, 只保留相关系数绝对值不小于0.5的点。如图6(a)所示, 反气旋涡SST与振幅的相关系数没有明显的正负分界线, 正负相关系数均匀分布。图6(b)为气旋涡SST与涡旋振幅相关系数空间分布图, 由图6可知, 负相关系数主要分布在黑潮延伸区, 加利福尼亚外海的相关系数大部分为正。对比图6(a)与图6(b)SST与振幅的相关系数可知, 正相关系数大的反气旋涡的数量多于气旋涡的数量。如图6(c)所示, 反气旋涡

SST与涡度的相关系数在加利福尼亚外海与阿拉斯加湾东部几乎全为负相关系数, 其余海区正相关系数的反气旋涡数量略多于负相关系数的反气旋涡数量。由图6(d)可知, 气旋涡SST与涡度的相关系数绝大部分为负, 黑潮延伸区的相关系数大部分为负, 有少量正相关系数分布, 其余海区亦以负相关系数为主。总体而言, 气旋涡SST与涡度呈负相关。如图6(e)所示, 反气旋涡的SST与EKE的相关系数在大部分海区主要为正, 而在阿拉斯加湾东部海区、亲潮区与黑潮延伸区东侧以负相关系数为主。对于气旋涡(图6(f)), SST与EKE相关系数主要为正, 仅在部分海区分布着极少数的负相关系数, 说明气旋涡的SST与EKE呈正相关。

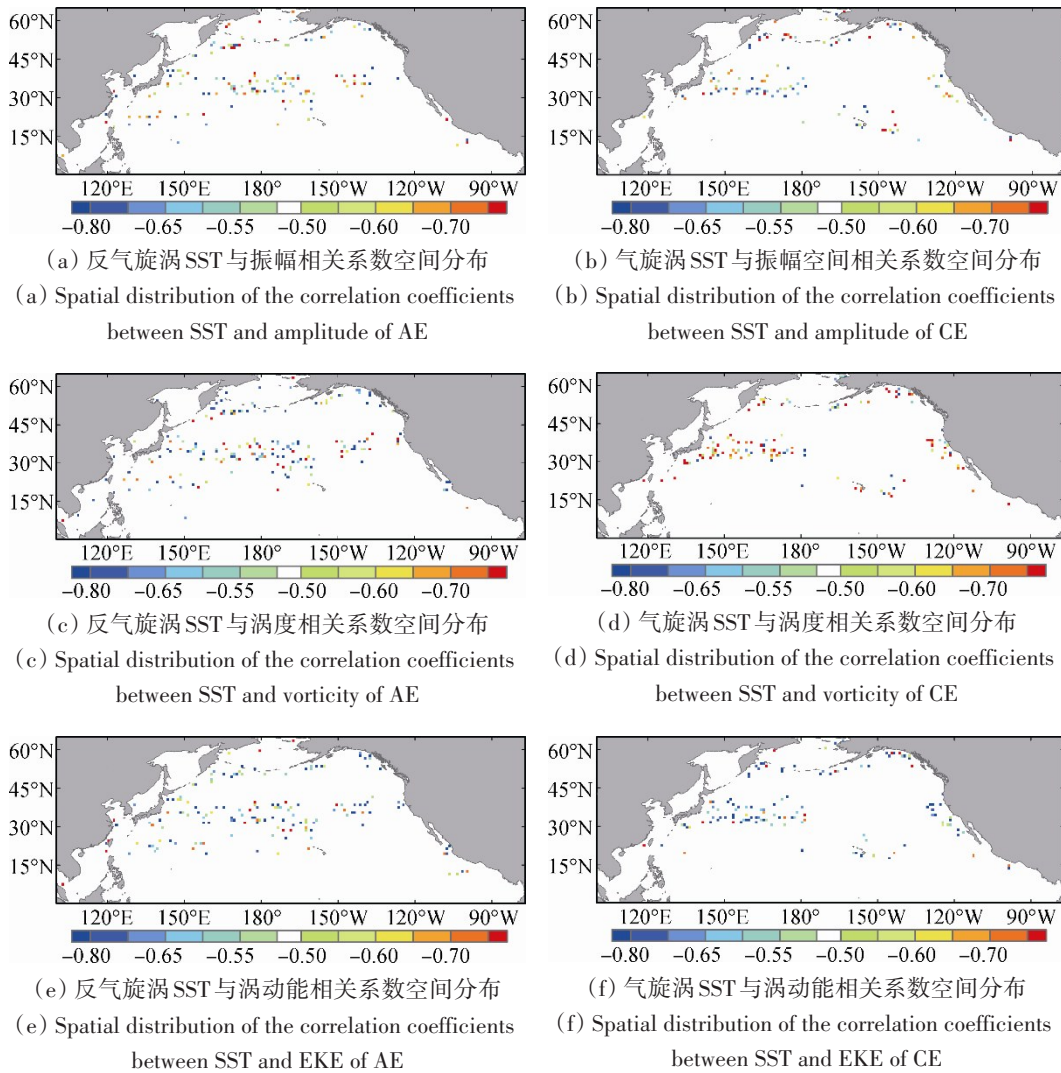


图6 北太平洋2007年—2012年SST与海洋动力参数相关系数 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of the correlation coefficients between SST and physical ocean parameters over  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$

### 3.4 叶绿素 a 浓度与海洋动力参数的相互关系

为了解中尺度涡 Chl-a 浓度与涡度、振幅和 EKE 相互关系的空间分布, 分别作出 Chl-a 浓度与涡度、振幅和 EKE 相关系数的空间分布图, 为了便于分析, 只保留相关系数绝对值不小于 0.5 的点。如图 7(a)和图 7(b)分别为反气旋涡与气旋涡的 Chl-a 浓度与振幅的相关系数  $1^\circ \times 1^\circ$  网格空间分布图。反气旋涡(图 7(a))Chl-a 浓度与振幅的相关系数大部分为正, 且相关系数的分布较为均匀。对于气旋涡(图 6(b)), Chl-a 浓度与振幅的正相关系数主要分布在黑潮延伸区和阿拉斯加湾湾顶区域。如图 7(c)、图 7(d)分别为反气旋涡与气旋涡 Chl-a 浓度与涡度的相关系数的空间分布。如图 7(c)所示,

反气旋涡的 Chl-a 浓度与涡度的相关系数主要为正, 且大部分正相关系数分布在黑潮延伸区与副热带逆流区, 亲潮区域的相关系数主要为负。对于气旋涡(图 7(d)), 黑潮延伸区与加利福尼亚外海的相关系数主要为正。如图 7(e)、图 7(f)分别为反气旋涡与气旋涡 Chl-a 浓度与 EKE 的相关系数的空间分布图。由图 7(e)可知, 反气旋涡正相关系数主要分布在黑潮延伸区东侧, 亲潮区相关系数主要为正, 其余区域内正相关系数与负相关系数大致均匀分布。对于气旋涡(图 7(f)), Chl-a 浓度与 EKE 相关系数主要为负, 且黑潮延伸区、加利福尼亚外海、亲潮区和阿拉斯加湾均分布着负相关系数。

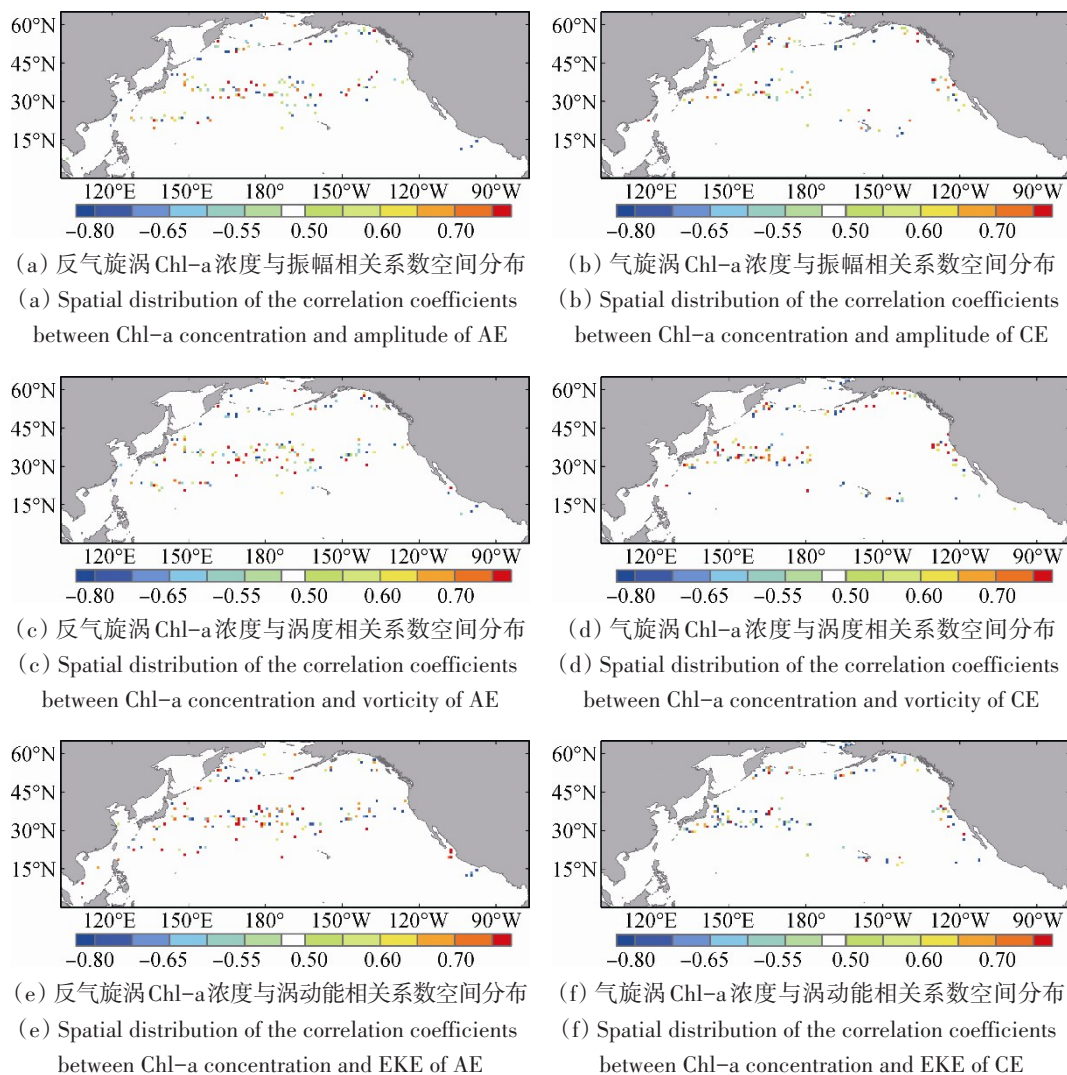


图 7 北太平洋 2007 年—2012 年 Chl-a 浓度与海洋动力参数相关系数  $1^\circ \times 1^\circ$  网格空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of the correlation coefficients between Chl-a concentration and physical ocean parameters over  $1^\circ \times 1^\circ$



### 3.5 典型长周期中尺度涡生态参数特征

从长周期( $\geq 15$ 周)的中尺度涡中分别选取3个气旋涡(CE1-CE3)和3个反气旋涡(AE1-AE3)作为典型涡来探讨中尺度涡的SST与Chl-a浓度的演化过程。选择的气旋涡(反气旋涡)来自气旋涡(反气旋涡)频发的海域,其空间位置如图8所示,具体信息见表1。图8给出了北太平洋长周期AE和CE的轨迹空间分布图,长周期的涡旋集中分布在黑潮延伸区。黑潮水高温高盐,斜压性强,强劲而稳定,是北太平洋中尺度涡生成最集中的区域,也是长周期涡旋生成数量最多的海区。73个长周期中尺度涡中,反气旋涡的数量(44个)多于气旋涡的

数量(29个)。长周期的气旋涡仅存在于黑潮延伸区、加利福尼亚外海、阿拉斯加湾与夏威夷海区;反气旋涡存在于副热带逆流区、黑潮延伸区、亲潮、阿拉斯加湾和加利福尼亚外海。

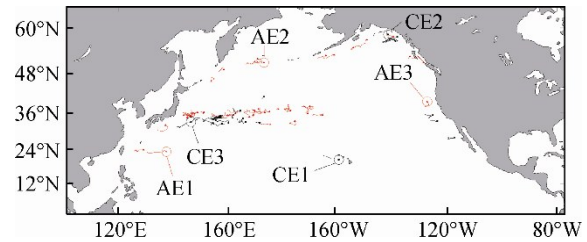


图8 长周期中尺度涡轨迹分布  
Fig.8 Trajectories of long-term mesoscale eddies

表1 长周期涡旋的基本属性统计表

Table1 Information of typical long-term eddies

涡旋	初始位置	终止位置	周期/周	起始日期	终止日期	产生区域
CE1	(160.00°W, 20.77°N)	(165.33°W, 22.01°N)	16	2010-07-07	2010-10-20	夏威夷海区
CE2	(141.67°W, 58.53°N)	(147.00°W, 58.00°N)	22	2011-11-02	2012-04-04	阿拉斯加湾
CE3	(146.67°E, 33.21°N)	(141.00°E, 31.80°N)	15	2012-07-25	2012-11-21	黑潮延伸区
AE1	(136.33°E, 23.86°N)	(130.33°E, 22.94°N)	16	2007-12-12	2008-03-12	副热带逆流区
AE2	(173.00°E, 51.06°N)	(168.00°E, 50.64°N)	30	2011-04-13	2011-11-02	亲潮区
AE3	(126.67°W, 38.87°N)	(128.33°W, 37.82°N)	16	2011-09-21	2012-02-01	加利福尼亚外海

为描述典型中尺度涡的SST、温度强度和Chl-a浓度随时间的变化特征,分别做出每个涡的SST、温度强度和Chl-a的时间变化曲线(图9)与各参数在周期内的平均值(表2)。CE1—CE3的各生态参数变化趋势分别如图9(a)—图9(c)所示。CE1的SST小幅升高,至14周达最大值,变化幅度为0.98℃,均值为26.78℃,SST在第14周达到最大值27.10℃,随后迅速降低;该涡处于北太平洋贫营养盐区,Chl-a浓度小,均值为0.085 mg/m<sup>3</sup>,且变化幅度小,生命周期后半程的Chl-a浓度高于前半程;温度强度在生命周期内变化幅度较小(0.147℃-0.373℃),在最后一周达到最大值0.37℃。CE2的SST较低(温度均值为5.21℃),随生命周期而逐渐降低;Chl-a浓度总体呈先降后升的趋势;温度强度随生命周期大幅升高。CE3的SST随生命周期而逐渐降低;Chl-a浓度与温度强度有相似的变化趋势,均随生命周期而减小。AE1-AE3的各生态参数变化趋势分别如图9(d)—图9(f)所示。AE1的SST在生命周期内呈下降趋势,

最大值27.48℃出现在第3周,最小值24.34℃出现在第15周;Chl-a浓度在前12周呈平稳态势,随后快速升高;温度强度整体偏高,均值为2.74℃,前11周变化幅度较小,随后变化幅度较大。AE2的SST随生命周期逐渐升高,在生命周期末期SST下降;Chl-a浓度在生命周期内波动较大;温度强度随生命周期升高。AE3的SST随生命周期大幅下降;Chl-a浓度基本呈平稳变化趋势;温度强度在生命周期前半段快速下降,后半段小幅上升。

表2 典型长周期涡旋生态参数表

Table 2 Ecological parameters of typical long-term eddies

涡旋	平均温度 /°C	平均温度强度 /°C	平均Chl-a浓度 /(mg/m <sup>3</sup> )
CE1	26.78	0.23	0.085
CE2	5.21	1.96	0.228
CE3	25.59	0.60	0.098
AE1	25.84	2.74	0.079
AE2	7.75	1.22	0.574
AE3	14.29	1.09	0.137

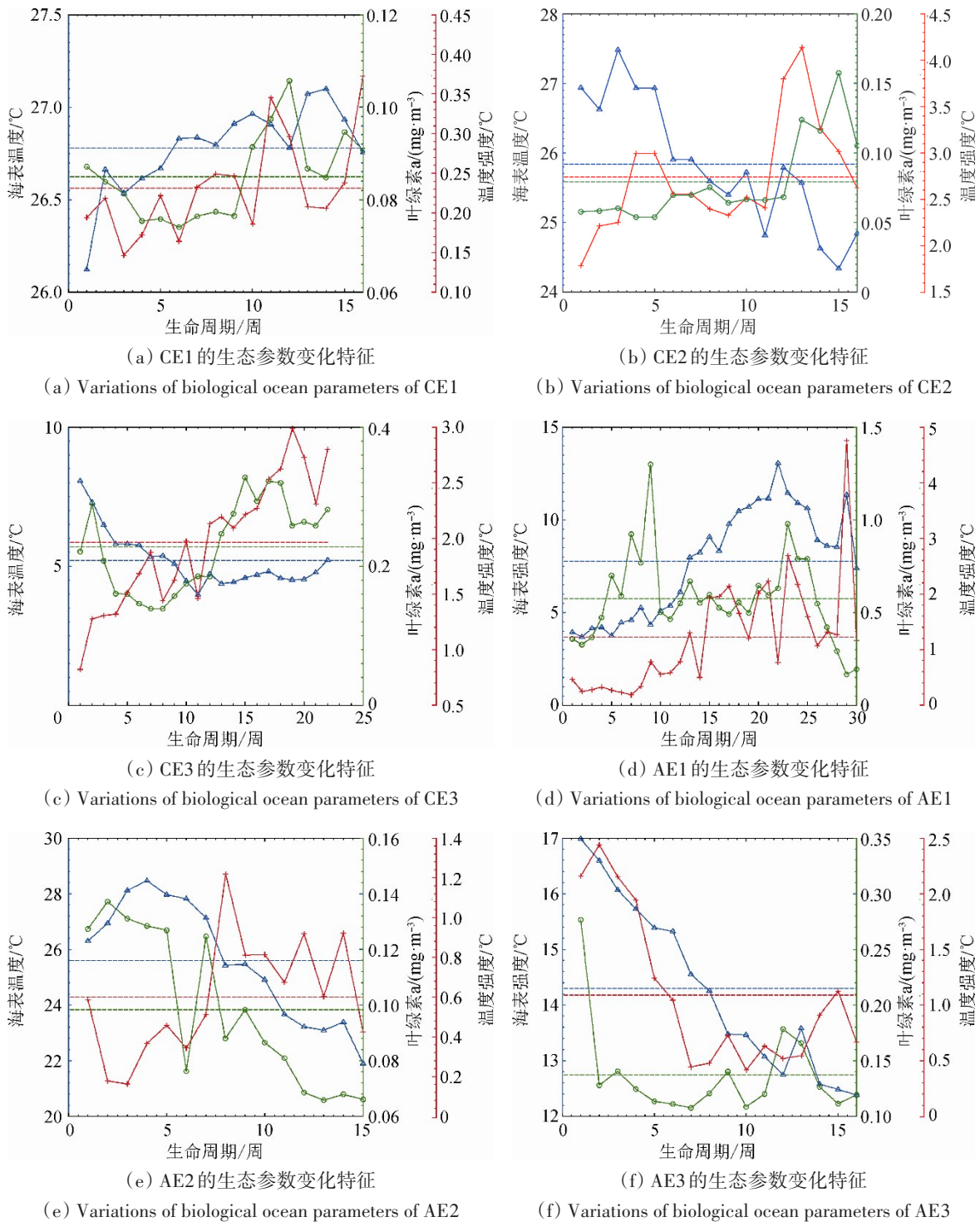


图9 长周期气旋涡和反气旋涡 SST、温度强度和 Chl-a 浓度的变化特征

Fig.9 Variations of SST, temperature intensity and Chl-a concentration of long-term mesoscale eddies

## 4 结论

本文利用 2007 年—2012 年 AVISO 的 SLA 资料对北太平洋中尺度涡进行提取和追踪, 并利用 OSTIA 的 SST 资料与 MODIS 的 Chl-a 浓度资料分析了北太平洋中尺度涡 SST 和 Chl-a 浓度的时空分布

特征, 并分析北太平洋典型中尺度涡的 SST 与 Chl-a 浓度的演化特征。主要结论如下:

(1) 气旋涡 SST 具有明显的月和年际变化特征。温度强度较强的气旋涡和反气旋涡均集中分布在黑潮延伸区。

(2) 气旋涡与反气旋涡的 Chl-a 浓度月变化趋势

相同且变化特征明显,而年际变化均不明显。Chl-a浓度值高的气旋涡和反气旋涡主要分布在高纬海域。

(3)中尺度涡 SST与海洋动力参数(振幅、涡度和涡动能)的相关性在北太平洋不同海区呈现不同的变化趋势。

(4)中尺度涡 Chl-a浓度与海洋动力参数的相关性在黑潮延伸区和阿拉斯加湾均呈正相关。

(5)中尺度涡对生态过程的影响作用不仅跟涡旋类型有关,还跟涡旋生命周期有关。

本文给出的结论主要针对中尺度涡温度强度和 Chl-a浓度的统计特征,由于样本数量有限,得到的结论需要通过扩充样本量进行验证。黑潮区域的气旋涡、反气旋涡的温度强度和 Chl-a浓度与海洋动力参数的相关性具有明显的差异,将在下一步的工作中继续加以验证。

## 参考文献(References)

- Benitez-Nelson C R, Bidigare R R, Dickey T D, Landry M R, Leonard C L, Brown S L, Nencioli F, Rii Y M, Maiti K, Becker J W, Bibby T S, Black W, Cai W J, Carlson C A, Chen F Z, Kuwahara V S, Mahaffey C, McAndrew P M, Quay P D, Rappé M S, Selph K E, Simmons M P and Yang E J. 2007. Mesoscale eddies drive increased silica export in the subtropical Pacific ocean. *Science*, 316(5827): 1017-1021 [DOI: 10.1126/science.1136221]
- Bibby T S, Gorbunov M Y, Wyman K W and Falkowski P G. 2008. Photosynthetic community responses to upwelling in mesoscale eddies in the subtropical North Atlantic and Pacific Oceans. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(10/13): 1310-1320 [DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.01.014]
- Chaigneau A, Gizolme A and Grados C. 2008. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. *Progress in Oceanography*, 79(2/4): 106-119 [DOI: 10.1016/j.pocean.2008.10.013]
- Chelton D B, Gaube P, Schlax M G, Early J J and Samelson R M. 2011b. 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 and Samelson R M. 2011a. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, 91(2): 167-216 [DOI: 10.1016/j.pocean.2011.01.002]
- Cong P F. 2006. Oceanic Chlorophyll Retrieval by Remote Sensing and Ocean Primary Production Estimate. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences) (丛丕福. 2006. 海洋叶绿素遥感反演及海洋初级生产力估算研究. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所))
- Donlon C J, Martin M, Stark J, Roberts-Jones J, Fiedler E and Wimmer W. 2012. The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment*, 116: 140-158 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.10.017]
- Dufois F, Hardman-Mountford N J, Greenwood J, Richardson A J, Feng M and Matear R J. 2016. Anticyclonic eddies are more productive than cyclonic eddies in subtropical gyres because of winter mixing. *Science Advances*, 2(5): e1600282 [DOI: 10.1126/sciadv.1600282]
- Falkowski P G, Ziemann D, Kolber Z and Bienfang P K. 1991. Role of eddy pumping in enhancing primary production in the ocean. *Nature*, 352(6330): 55-58 [DOI: 10.1038/352055a0]
- Garçon V C, Oschlies A, Doney S C, McGillicuddy D and Waniek J. 2001. The role of mesoscale variability on plankton dynamics in the North Atlantic. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 48(10): 2199-2226 [DOI: 10.1016/S0967-0645(00)00183-1]
- 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*, 118(12): 6349-6370 [DOI: 10.1002/2013JC009027]
- Gaube P, McGillicuddy Jr 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*, 119(12): 8195-8220 [DOI: 10.1002/2014JC010111]
- Gruber N, Lachkar Z, Frenzel H, Marchesiello P, Münnich M, McWilliams J C, Nagai T and Plattner G K. 2011. Eddy-induced reduction of biological production in eastern boundary upwelling systems. *Nature Geoscience*, 4(11): 787-792 [DOI: 10.1038/ngeo1273]
- Martin A P and Pondaven P. 2003. On estimates for the vertical nitrate flux due to eddy pumping. *Journal of Geophysical Research*, 108(C11): 3359 [DOI: 10.1029/2003JC001841]
- Maúre E R, Ishizaka J, Sukigara C, Mino Y, Aiki H, Matsuno T, Tomita H, Goes J I and Gomes H R. 2017. Mesoscale eddies control the timing of spring phytoplankton blooms: a case study in the Japan Sea. *Geophysical Research Letters*, 44(21): 11115-11124 [DOI: 10.1002/2017GL074359]
- Parker C E. 1971. Gulf stream rings in the Sargasso Sea. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 18(10): 981-993 [DOI: 10.1016/0011-7471(71)90003-9]
- Qin L J, Dong Q, Fan X, Xue C J, Hou X Y and Song W J. 2015. Temporal and spatial characteristics of mesoscale eddies in the North Pacific based on satellite altimeter data. *Journal of Remote Sensing*, 19(5): 806-817(秦丽娟, 董庆, 樊星, 薛存金, 侯雪燕, 宋晚郊. 2015. 卫星高度计的北太平洋中尺度涡时空分析. *遥感学报*, 19(5): 806-817) [DOI: 10.11834/jrs.20154154]
- Qiu B and Chen S M. 2010. Eddy-mean flow interaction in the decadal modulating Kuroshio Extension system. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57(13/14): 1098-1110 [DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.11.036]
- Richardson P L. 1980. Gulf stream ring trajectories. *Journal of Physical Oceanography*, 10(1): 90-104 [DOI: 10.1175/1520-0485(1980)

- 010<0090:GSRT>2.0.CO;2]
- Robinson D J, Mayo M A, Fritsch C, Jones A T and Raschke J H. 1983. Origin and messenger activity of two small RNA species found in particles of tobacco rattle virus strain SYM. *Journal of General Virology*, 64(7): 1591-1599 [DOI: 10.1099/0022-1317-64-7-1591]
- Siegel D A, Court D B, Menzies D W, Peterson P, Maritorena S and Nelson N B. 2008. Satellite and in situ observations of the bio-optical signatures of two mesoscale eddies in the Sargasso Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(10/13): 1218-1230 [DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.01.012]
- Sukigara C, Suga T, Toyama K and Oka E. 2014. Biogeochemical responses associated with the passage of a cyclonic eddy based on shipboard observations in the western North Pacific. *Journal of Oceanography*, 70(5): 435-445 [DOI: 10.1007/s10872-014-0244-6]
- Xiu P and Chai F. 2011. Modeled biogeochemical responses to mesoscale eddies in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 116(C10): C10006 [DOI: 10.1029/2010JC006800]
- Yamada K, Ishizaka J, Yoo S, Kim H C and Chiba S. 2004. Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll *a* concentration in the Japan/East Sea (JES). *Progress in Oceanography*, 61(2/4): 193-211 [DOI: 10.1016/j.pocean.2004.06.001]

## Characteristics of sea surface temperature and Chlorophyll concentration inside mesoscale eddies in the North Pacific Ocean

ZHENG Xiaoli<sup>1,2</sup>, DONG Qing<sup>1</sup>, FAN Xing<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Digital Earth Sciences, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Mesoscale eddies are active in the North Pacific Ocean (NPO) sensitive to the global variation of the atmosphere and ocean and directly affect the climate and coastal areas of the country. Therefore, the influence of the mesoscale eddies in the NPO on the marine ecological environment needs to be examined. The relationship between Sea Surface Temperature (SST) and Chlorophyll-a (Chl-a) concentration inside these eddies as well as the response mechanism of these eddies to local ecological processes also warrant further research.

In this paper, the Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO)-merged satellite altimeter data are used to identify and track 992 mesoscale eddies in the NPO during the years of 2007-2012, including 442 Cyclonic Eddies (CEs) and 550 Anticyclonic Eddies (AEs), in the NPO between 2007 and 2012. The spatial and temporal distributions of the SST and the Chl-a concentration inside these eddies are analyzed via Operational Sea surface Temperature and sea Ice Analysis (OSTIA) SST and MODIS data, and the variability of these parameters inside typical eddies is examined.

The results show that the temperature intensity of CEs ( $I_{CE}$ ) has a higher tendency to demonstrate monthly variations compared with that of AEs ( $I_{AE}$ ). The seasonal variation of  $I_{CE}$  tends to contrast that of  $I_{AE}$ . Specifically,  $I_{CE}$  shows an obvious annual variation, whereas  $I_{AE}$  does not. Stronger  $I_{CE}$  and  $I_{AE}$  are observed in the Kuroshio Extension intensively. Both CEs and AEs have similar monthly variation tendencies in the temporal and spatial distributions of eddy Chl-a. The annual trends of Chl-a in both AEs and CEs are ambiguous. For AEs and CEs, the highest Chl-a concentration is observed in the high-latitude region. A study of the relationship between the eddy SST and eddy dynamic parameters (e. g., amplitude, vorticity, and Eddy Kinetic Energy (EKE)) reveals that SST inner AEs are either positively or negatively correlated to amplitude with a uniform distribution in space. A negative correlation of SST inner CEs can be observed in the Kuroshio Extension, whereas a positive correlation is observed in offshore areas of California. A positive correlation is more frequently observed in AEs than in CEs. The correlation of SST with vorticity in AEs is either positive or negative, while in CEs, SST shows a negative correlation with vorticity. The correlation of SST with EKE in AEs is either positive or negative, but such correlation is only positive uniquely in CEs. The Chl-a concentration in AEs is positively correlated with amplitude and has a uniform distribution in space. In CEs, Chl-a concentration shows a positive correlation with amplitude in the Kuroshio Extension and in Alaska Bay. Chl-a concentration also shows a positive correlation with vorticity in both AEs and CEs, a positive correlation with EKE in AEs, and either a positive or negative correlation with EKE in CEs.

We conclude that SST demonstrates obvious monthly and annual variation tendencies in CEs, and high  $I_{CE}$  and  $I_{AE}$  values are distributed in the Kuroshio Extension of the NPO. The Chl-a concentration in CEs and AEs demonstrate a similar monthly variation tendency and an ambiguous annual variation. Eddies with a high Chl-a concentration are mainly located in the high-latitude region of the NPO. The relationship between the eddy SST and the eddy dynamic parameters is treated as a local feature of the NPO, and a positive relationship between eddy Chl-a concentration and eddy dynamic parameters is observed in the Kuroshio Extension and Alaska Bay. The influence of mesoscale eddies on the ecological processes is related to the type and eddy lifetime of eddies in the NPO.

**Key words:** remote sensing, Chlorophyll concentration, sea surface temperature, temperature intensity, mesoscale eddy, North Pacific Ocean

**Supported by** National Natural science Foundation of China(No.41876210,41476154); The National Key Research and Development Program(No.2017YFA0603003)