

# 中国南海表层叶绿素 $a$ 季节内变化特征及成因

连 展<sup>1,2</sup>, 王新怡<sup>1,2</sup>, 魏泽勋<sup>1,2\*</sup>

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

**摘 要:** 对中国南海表层叶绿素  $a$  季节内变化的研究有助于深入认识其海洋特征, 满足渔情预报等实际应用需求。利用卫星观测资料分析南海表层叶绿素  $a$  不同季节的季节内变化特征, 结果表明南海表层叶绿素  $a$  季节内振荡强度冬季最高。冬季和春季的季节内振荡最强区域都位于吕宋岛西北侧海区, 夏季和秋季振荡较强的区域偏向菲律宾群岛一侧。分析表明研究海区表层温度和表层叶绿素  $a$  存在负相关, 冬强夏弱, 北强南弱。大部分海区海面高度和叶绿素  $a$  相关性不显著, 但南海东南边缘海区海面高度和叶绿素  $a$  在季节内存在正相关。冬季海盆尺度逆时针旋转的环流结构应是这些现象产生的原因。除南海东南边缘海区、海南岛东南海区和吕宋岛西侧海区之外, 风应力大小和热通量均与叶绿素  $a$  在季节内呈正相关。这显示非局地风场和海流等因素、海洋动力调整过程可能在吕宋海峡以西和南海东南边缘的表层叶绿素  $a$  季节内变化中起到重要作用。

**关键词:** 中国南海; 表层叶绿素  $a$ ; 季节内变化

**中图分类号:** P731

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-6647(2020)04-0649-13

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.009

**引用格式:** LIAN Z, WANG X Y, WEI Z X. Features and driving mechanisms of the intra-seasonal variations of sea surface chlorophyll  $a$  in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(4): 649-661. 连展, 王新怡, 魏泽勋. 中国南海表层叶绿素  $a$  季节内变化特征及成因[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(4): 649-661.

中国南海海域内各类海洋现象丰富, 且与我国大部分区域的水文、气象现象关系密切。作为我国正在建设的“海上丝绸之路”的起点, 该海域的海洋环境研究具有重要的科学和策略意义。每个季节内具有数十天的振荡周期的变化被称为季节内变化。南海多种海洋要素都具有显著的季节内变化特征<sup>[1-3]</sup>, 其中南海海区海洋表层叶绿素  $a$  的季节内变化尤为明显<sup>[4]</sup>。

对南海叶绿素  $a$  季节内变化的深入研究, 具有多层面的科学意义。首先海洋叶绿素  $a$  是一种对中尺度水动力现象良好的指示物, 可以从不同角度揭示中尺度涡旋的运动和结构特征<sup>[5]</sup>。因此深入研究有助于推动对研究海域海洋环境的认识走向“全面化”和“立体化”。其次, 对南海表层叶绿素  $a$  季节内时空特点的准确把握, 是开发南海内远离陆架海域(离岸海域)渔业资源的必要基础<sup>[6]</sup>。南海渔业资源富饶, 是我国的重要渔场之一。近 30 a 来, 南海内近岸海域渔业资源由于过度捕捞已严重萎缩<sup>[7]</sup>。而南海离岸海域丰富的大洋性金枪鱼类和头足类资源具有较大的开发潜力, 是未来南海渔业资源开发的重要目标<sup>[8]</sup>。渔情分析预报是外海渔业开发的必要基础, 而叶绿素  $a$  是进行渔情分析和渔获量估算的关键参数, 其季节内变化与渔情预报的关键时间窗口吻合。第三, 叶绿素  $a$  与海洋固碳能力相关<sup>[5]</sup>, 准确估算中国南海海洋固碳能力, 可以促进碳排放相关国际热点议题研究。

**收稿日期:** 2019-08-19

**资助项目:** 国家重点研发计划项目——海上交通溢油监测预警与防控技术研究及应用(2016YFC1402304); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金——中尺度海洋涡旋对南海北部叶绿素  $a$  季节内变化的影响研究(2017Q06); 国家自然科学基金项目——南海北部温跃层季节内变化特征及其成因研究(41506037)

**作者简介:** 连 展(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事大洋环流方面研究. E-mail: lianzhan@fio.org.cn

\* **通信作者:** 魏泽勋(1970-), 男, 研究员, 博士, 主要从事大洋环流方面研究. E-mail: weizx@fio.org.cn

(高 峻 编辑)

对于中国南海表层叶绿素  $a$  季节内变化,已有许多学者应用不同方法从各种角度开展了相关研究。Tang 等<sup>[4]</sup>和石晓勇等<sup>[9]</sup>分别应用卫星遥感数据或航次定点观测数据对叶绿素  $a$  在季节内变化开展相关研究,结果显示南海表层叶绿素  $a$  季节内变化强度具有明显的时空差异。而数值模式的结果<sup>[10-11]</sup>也显示了基本一致的结论。Lin 等<sup>[12]</sup>和 Chen 等<sup>[13]</sup>则通过一些个例分析,研究了不同海区不同事件影响下南海表层叶绿素  $a$  的季节内变化特征。不同学者从多种角度开展了这些变化的原因和机制研究。如涡旋搅拌、水平输运和海面风场等要素都可能对南海表层叶绿素  $a$  的季节内变化产生影响<sup>[14-17]</sup>。冷晓云等<sup>[18]</sup>通过航次调查数据发现中南半岛西侧的冷涡对叶绿素  $a$  有显著的影响。Yang 等<sup>[19]</sup>发现在东沙群岛附近频繁发生的海洋内波可以导致表层叶绿素  $a$  的升高。Loise 等<sup>[20]</sup>指出在越南沿岸,短周期的表层叶绿素  $a$  变化强度可能接近季节变化的一半,这都揭示叶绿素  $a$  季节内变化及成因研究的重要性。

海洋表层叶绿素  $a$  受海洋本身动力调整导致的各项要素变化、大气强迫等外界因素的共同影响。而对于不同时段不同海区的各项要素和表层叶绿素  $a$  在季节内的系统的相关性分析迄今为止尚不多见。南海海区海洋中尺度现象频发<sup>[21]</sup>,黑潮等外海强流可能显著地影响南海的海洋生化条件<sup>[22]</sup>。同时本海域又是典型季风海区,不同季节大气条件差异非常明显。对这些不同要素和南海表层叶绿素  $a$  在季节内的关系研究,是进一步揭示叶绿素  $a$  季节内变化控制机制,进而掌握其变化规律,提升预报精度的必要基础。

我们依据多源卫星遥感观测数据,对南海海区表层叶绿素  $a$  季节内变化基本特征及其受各类动力和热力要素的影响展开分析,得出不同时段不同海区表层叶绿素  $a$  季节内变化的主导因素。旨在揭示中国南海表层叶绿素  $a$  季节内变化特征及成因,为科学研究与应用提供基础资料。

## 1 数据和方法

我们选用 GlobColour 表层卫星遥感叶绿素  $a$  观测数据<sup>[23]</sup>作为研究的数据资料。其融合了多个卫星传感器数据,可保证数据在空间和时间上的连续性,并可以显著地降低产品中的噪声干扰,这使得该数据集尤其适用于研究长期叶绿素  $a$  变化规律。该数据集的空间覆盖范围为全球,其分辨率最高可达 1 km。整个数据集的有效数据时段的多源卫星包括 SeaWiFS, MERIS, MODIS AQUA, VIIRS 和 OLCI-A。有效数据最早可追溯至 1997-09,目前在其官方网站上数据仍在实时进行更新。在本研究中我们选取的有效数据为 1998—2017 年(图 1~10 均为此时段)。该数据集在空间数据融合中采取多种处理方法,包括简单平均法(Simple Averaging)、权重平均法(Weighted Averaging)和 GSM 模式法(GSM Model)等。为保证数据的统一连续性,我们选用权重平均法得到的空间格点化产品。选取叶绿素质量浓度( $\text{mg}/\text{m}^3$ )作为目标分析要素,该数据产品适用于研究海区的水体<sup>[23]</sup>,可以保证本研究的可靠性。

我们采用的所有数据的时间覆盖范围选取与叶绿素  $a$  数据相同。表层温度数据源于 OISST 数据集<sup>[24]</sup>,海面高度数据源于 AVISO 数据集<sup>[25]</sup>,海面风场和热通量数据源于 NCEP<sup>[26]</sup>。海洋混合层厚度源于全球海洋混合层数据集(基于 Argo)<sup>[27]</sup>。营养盐数据源于全球海洋数据集(简称 WOA2013)<sup>[28]</sup>。我们选用硝酸盐浓度大于  $1 \times 10^{-6}$  mol/L 的深度指示营养盐跃层位置,即代表营养盐变化极大层(营养盐跃层)深度<sup>[21]</sup>。

我们选取的研究海区为南海及周边海域( $105^\circ \sim 130^\circ \text{E}$ ,  $0^\circ \sim 25^\circ \text{N}$ )。为了提取季节内变化,所有数据的时间序列均经过带通滤波,其通过周期为 20~90 d。对滤波后的数据标准差代表对应要素季节内的强度。

## 2 结果与讨论

我们提取与分辨研究海区表层叶绿素  $a$  的季节变化特征后,分析不同季节(春季为 3 月、4 月和 5 月,夏季为 6 月、7 月和 8 月,秋季为 9 月、10 月和 11 月,冬季为 12 月、1 月和 2 月)其季节内变化强度,并与表层温度、海面高度、海面风场和海面热通量的季节内变化进行相关分析,对不同海区不同时段叶绿素  $a$  季节内变

化的主要驱动机制进行讨论。

### 2.1 季节变化特征

分析表明南海近海区表层叶绿素 *a* 质量浓度较高,远海区的较低。叶绿素 *a* 质量浓度存在显著的季节变化。冬季南海表层叶绿素 *a* 质量浓度较高,高值区位于南海北部;夏季较低,高值区位于南海南部(图 1 中以 2 月和 8 月为例,分别代表冬季和夏季)。

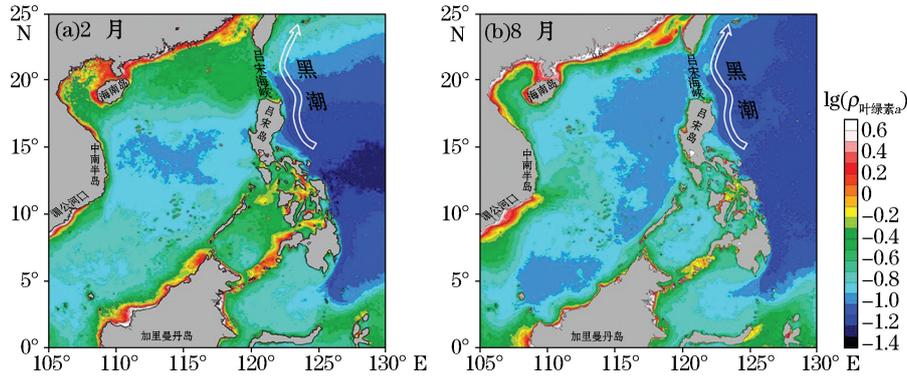


图 1 中国南海及周边海区表层叶绿素 *a* 质量浓度( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )冬夏季月平均结果  
Fig.1 The climatological monthly mean of chlorophyll *a* ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) in the South China Sea and adjacent seas in winter and summer

### 2.2 季节内变化特征

南海表层叶绿素 *a* 的整体季节内振荡强度冬季(12 月、1 月和 2 月)最高(图 2)。

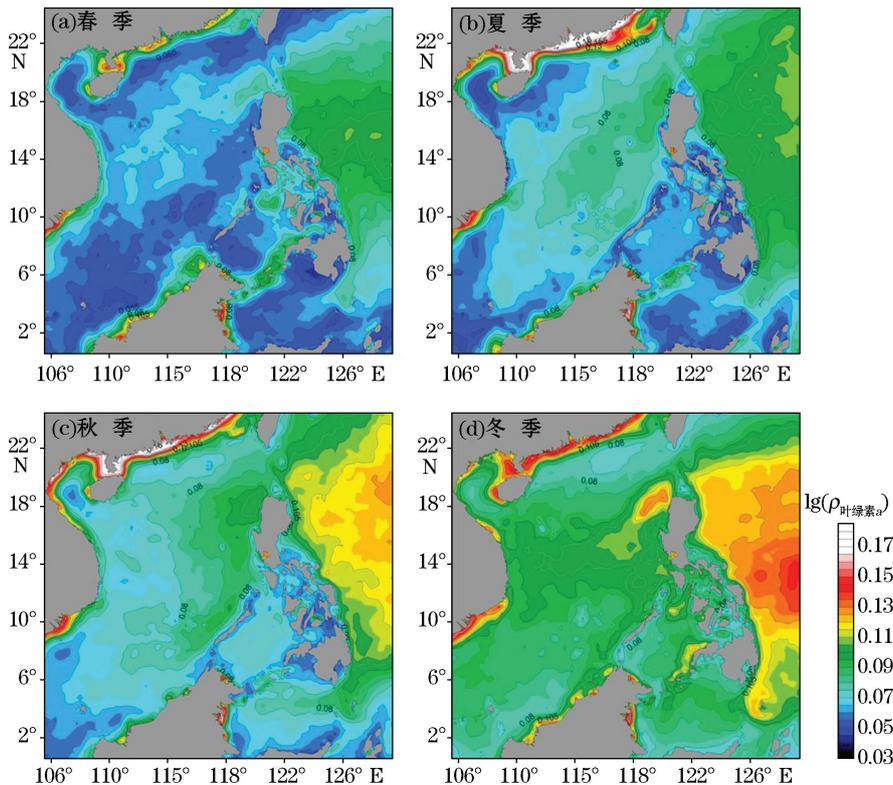


图 2 南海及周边海区表层叶绿素 *a* 质量浓度( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )四季季节内变化强度  
Fig.2 Intensity of intra-seasonal variation of chlorophyll *a* ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) in the South China Sea and adjacent seas in 4 seasons

冬春季季节内振荡最强区域都位于吕宋岛西北侧海区,可能是由于黑潮入侵南海较频繁,并且盛行的东北季风在此区域受吕宋岛地形阻挡产生很强的风场旋度。这些多种因素共同作用导致本海区海水动力调整过程强度较高,进而使得下层富营养海水较容易进入上层海水,在季节内提升了表层叶绿素 *a* 质量浓度。夏季和秋季的季节内振荡强度空间分布特征比较接近,一个较为明显的特点为南海偏向菲律宾群岛一侧海区的季节内变化强度高于西侧。

中国南海表层叶绿素 *a* 季节内变化与季节变化或更长时间尺度的变化之间的相对关系也很重要。例如某些海区虽然叶绿素 *a* 季节内变化本身强度不大,海区背景的背景长期表层叶绿素 *a* 变化幅度非常小,这一海区表层叶绿素 *a* 的变化全部集中在季节内。即海区叶绿素 *a* 季节内变化绝对值较小的情况下,开展季节内分析对研究此海区的表层叶绿素 *a* 变化仍非常重要。这一特征用季节内标准差( $STD_{\text{季节内}}$ )和背景长期变化标准差( $STD_{\text{长期}}$ )的相对比例系数( $STD_{\text{相对}} = STD_{\text{季节内}} / STD_{\text{长期}}$ )来表示,当  $STD_{\text{相对}}$  越大时,说明季节内振荡越重要。我们的研究结果显示,整个南海海区  $STD_{\text{相对}}$  值都是非常大的(图 3,最小值  $>0.5$ )。但在不同季节, $STD_{\text{相对}}$  值大小存在差异,夏秋季大于冬春两季。在夏秋季几乎整个南海海区  $STD_{\text{相对}} > 1$ 。除  $10^{\circ}\text{N}$  附近中南半岛一侧海区外,这一海区在此季节盛行的海流系统为越南离岸流,其由湄公河口流入南海,将富含营养盐和叶绿素的海水运输至离岸海区。当该海流增强时,其流经区域的表层叶绿素 *a* 出现升高。这一海流盛行的时间超过 90 d,其引起的表层叶绿素 *a* 变化周期长于季节内变化,因此可导致季节内叶绿素 *a* 变化在此海区所占比例的降低。

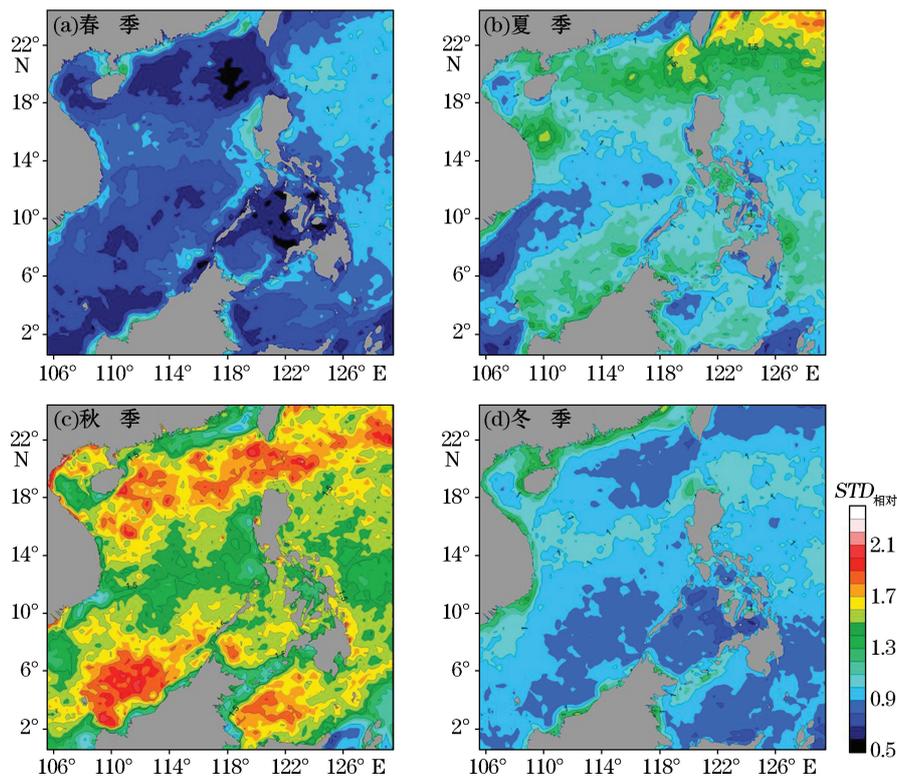


图 3 南海及周边海区表层叶绿素 *a* 季节内变化强度与长期变化强度的比例  
Fig.3 Ratio between the intensity of intra-seasonal variation of chlorophyll *a* and low-frequency variation of chlorophyll *a* in the South China Sea and adjacent seas

### 2.3 季节内变化机制分析

我们对影响中国南海表层叶绿素 *a* 季节内变化的外界驱动机制进行分析。鉴于浅海地区叶绿素 *a* 受

陆源输入等因素影响显著,我们将分析重点集中在深海地区水深 200 m 层。研究海区水体中,浮游植物密度远大于无机物粒子,因此我们选用的卫星数据产品可以真实地反映海洋表层叶绿素 *a* 变化情况<sup>[23]</sup>。我们对南海表层叶绿素 *a* 不同季节的季节内变化与表层温度、海面高度、海面风场和热通量同频段变化进行了相关分析,得到不同要素之间的相关系数。计算方法见文献[29]。相关性没有通过 95%置信度检验的在图 4 中以白色网格区域显示。

2.3.1 表层叶绿素 *a* 与表层温度

表层叶绿素 *a* 与表层温度季节内变化的相关分析(图 4)显示,四季中大部分时段叶绿素 *a* 和表层温度均成负相关,即当温度降低时叶绿素 *a* 质量浓度升高。研究表明这与海水动力调整过程有关。

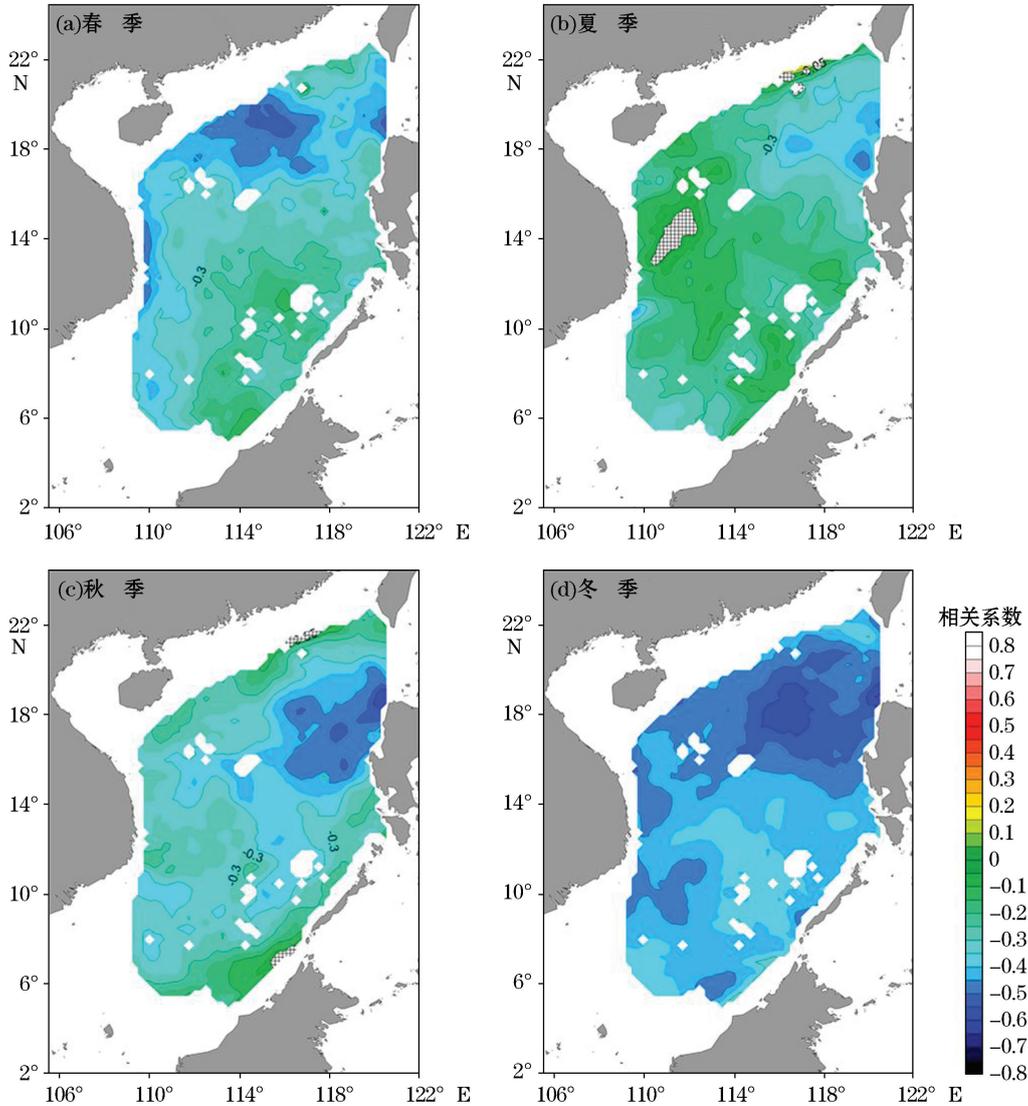


图 4 南海及周边表层叶绿素 *a* 四季季节内变化与表层温度季节内变化相关系数分布

Fig.4 Distribution of correlation coefficient between the intra-seasonal variation of chlorophyll *a* and the SST in the South China Sea and adjacent seas in 4 seasons

众所周知,在大洋内部当外强迫和海洋不稳定现象使海洋混合层变化时,表层以下低温海水携带高营养物质进入表层,海面叶绿素 *a* 升高的同时温度降低,二者负相关。南海海水叶绿素 *a* 质量浓度高于西太平洋海水的,同时南海表层温度低于西太平洋的。当黑潮通过吕宋海峡进入南海后,南海可出现同步的叶绿素

$a$  降低和温度升高现象。黑潮入侵南海的流轴和流量往往是不稳定的,存在季节内变化。这一机制也可导致叶绿素  $a$  和表层温度在季节尺度上存在负相关。叶绿素  $a$  季节内变化和海洋表层温度负相关程度在南海北部吕宋海峡以西海区最大,并且冬季整个海区平均相关系数绝对值显著高于其它季节,这与 2 方面的共同影响是分不开的。通过 Argo 数据所得到的海洋混合层厚度(图 5)和基于 WOA 2013 的海洋营养盐跃层深度(图 6)验证了这一结果。冬季吕宋海峡西侧海洋混合层厚度显著深于其他海区的,其深度也显著大于营养盐跃层深度,使得海洋上层混合变化更容易导致营养盐度变化,加深了表层温度和叶绿素  $a$  变化之间的联系。另一方面,黑潮入侵南海的高峰期也在冬季。因此,冬季 2 种机制影响均达到最大值,叶绿素  $a$  和海温出现显著负相关。

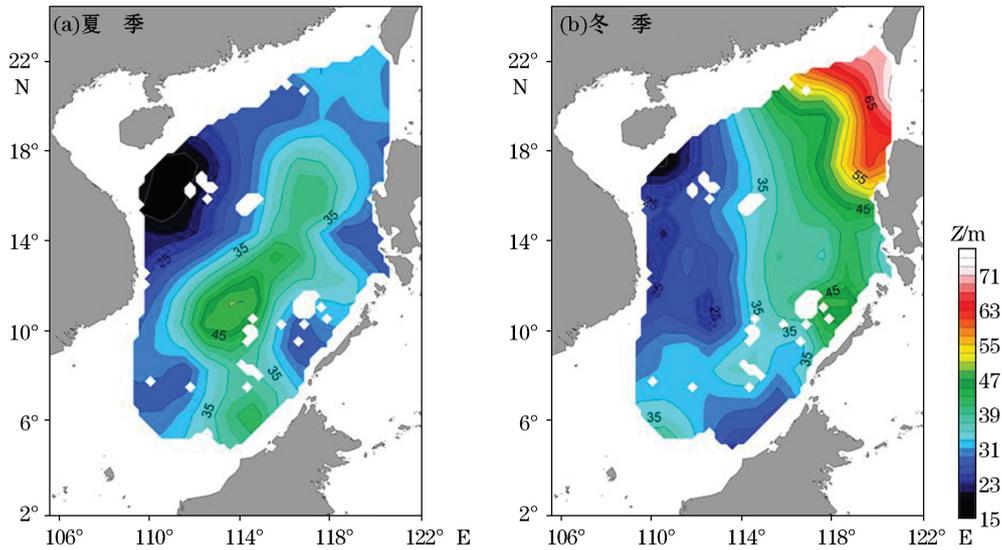


图 5 南海夏冬季海洋混合层厚度平面分布(Argo 数据)

Fig.5 Distribution of the mixed layer depth (data of Argo) in the South China Sea and adjacent seas in summer and winter

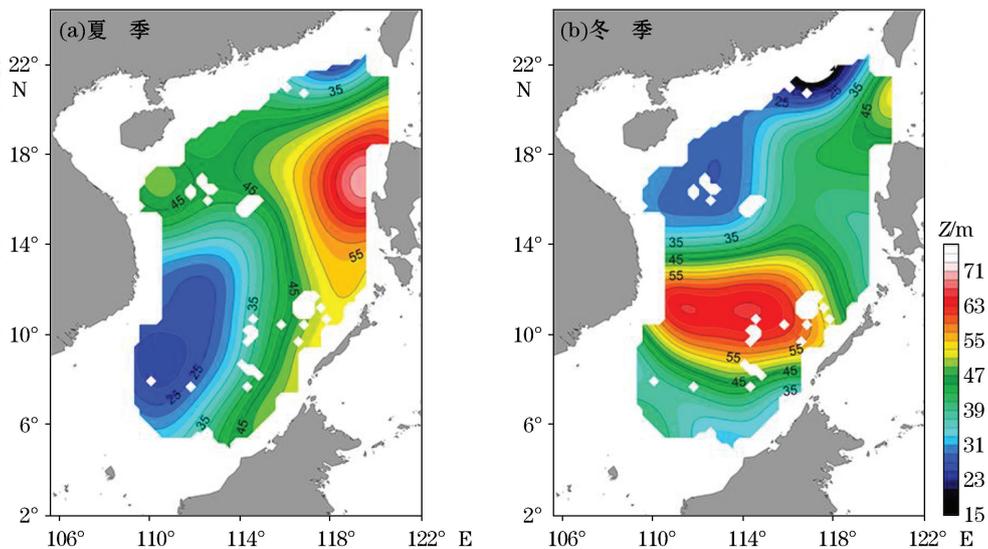


图 6 南海夏冬季海洋营养跃层深度平面分布(WOA 2013 数据)

Fig.6 Distribution of the nutricline depth (data of WOA 2013) in the South China Sea and adjacent seas in summer and winter

然而混合层和营养盐跃层的深浅关系并不能反映出海表温度和叶绿素 *a* 变化的全部关系。夏秋季,在南海南部混合层厚度也大于营养盐跃层厚度,但却不存在叶绿素 *a* 和表层温度的绝对值高相关,这显示有其它因素限制叶绿素 *a* 的变化。夏秋季节研究海域较高的背景表层温度<sup>[29]</sup>可能是主要限制因素。过高的温度使得充足营养供应的条件下,海洋生物仍然无法大量繁殖,表层叶绿素 *a* 未出现显著的升高。越南离岸流的存在也可能导致表层温度和表层叶绿素 *a* 的负相关关系不显著。因为离岸流会将沿岸高温高营养的海水输入进本海区,扰乱因为垂向混合导致的表层温度和叶绿素 *a* 之间的动力关系。

### 2.3.2 表层叶绿素 *a* 和海面高度

与表层温度的相关系数比较,表层叶绿素 *a* 和海面高度在季节内联系相对较不紧密(图 7)。图中白色网格区域同图 4,为相关性没有通过 95%置信度检验区域。前者的平均相关系数明显大于后者。

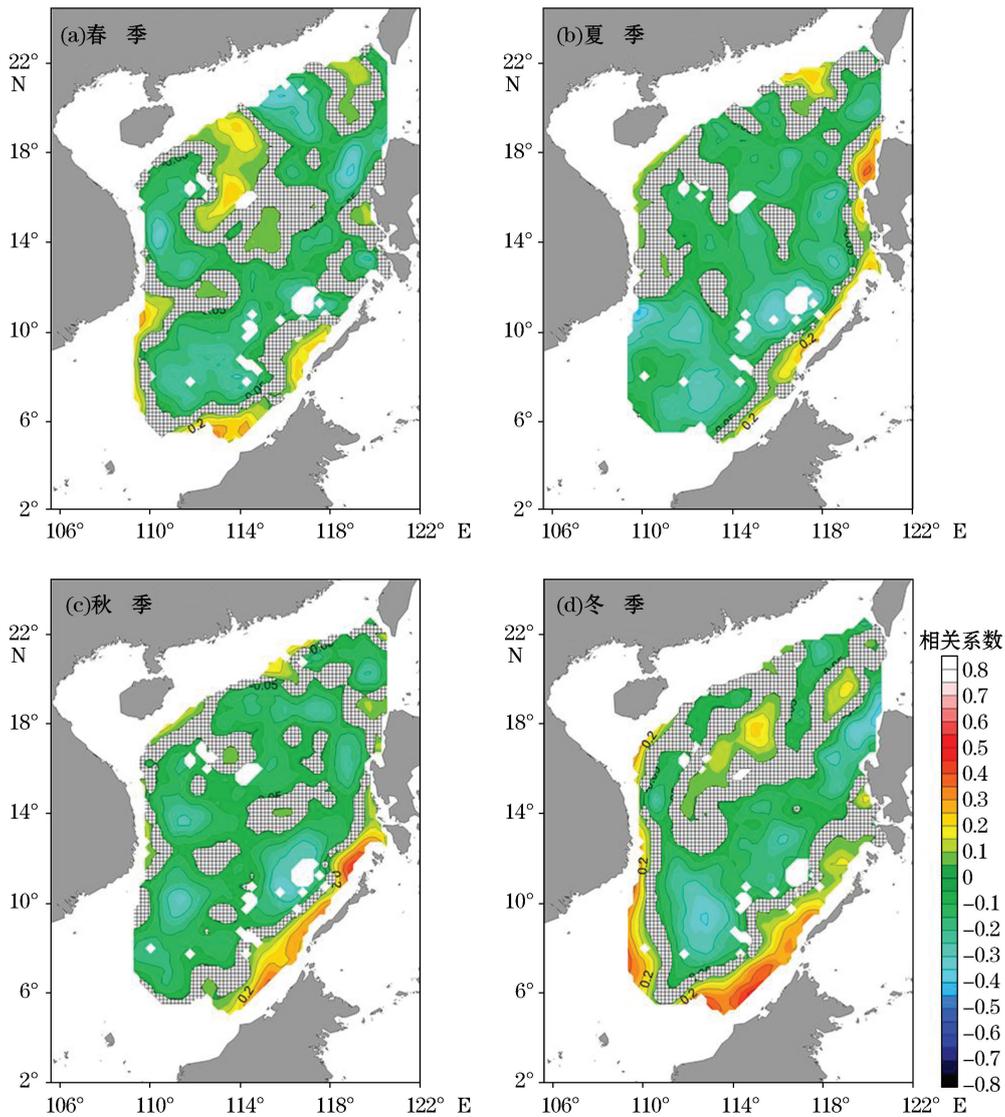


图 7 南海及周边海区表层叶绿素 *a* 四季季节内变化与表层高度季节内变化相关系数分布

Fig.7 Distribution of the correlation coefficient between the intra-seasonal variation of chlorophyll *a* and the SSH in the South China Sea and adjacent seas in 4 seasons

影响海面高度季节内变化的因素(如波动、海流等)众多,而这些动力因素无法直接导致海水的辐合辐散,难以驱动上层海水和下层富含营养物质的海水进行交换,即和表层叶绿素  $a$  的季节内变化没有相关性。而与表层叶绿素  $a$  变化联系密切的中尺度涡旋和上升流所导致的海面变化只是整体海面季节内变化中的一部分,因此整体海面季节内变化与表层叶绿素  $a$  的相应变化相关性不十分显著。

南海北部涡旋对叶绿素  $a$  的影响更多地体现在平流输运效应上<sup>[17]</sup>。即涡旋产生的叶绿素  $a$  异常空间结构为偶极子,与单极子的海面高度异常并不一致,二者并没有很高的相关性。在冬季南海东南和西南边缘陆架地区,存在 1 个较明显的海面变化与叶绿素  $a$  变化正相关的海区,其相关系数最大值可达 0.5。秋季该东南区域正相关仍较明显。海面高度与表层叶绿素  $a$  呈现正相关这一现象难以用上升流动力理论进行解释。与之一致的是,在表层温度的相关分析中,相关海区也不存在温度和叶绿素  $a$  变化的联系明显加强这一特征。

我们推测可能有其它的动力机制控制这一现象的产生。秋冬季节这一海区存在较强的沿陆架流系,海流方向为沿陆架逆时针旋转。海平面高度的变化与该海流的强弱有关,可通过水体输运的强度对研究海区表层叶绿素  $a$  造成影响。该海流较强时,可将较多的源地为巽他陆架的、含营养物质较丰富的海水输送至本海区。

为了验证这一推测,我们计算了 1998—2017 年每个冬季(12 月、1 月和 2 月)本海区平均的沿陆架海流流速、海平面高度和叶绿素  $a$  质量浓度季节内变化(图 8)。研究结果与我们推测相一致,在季节内当目标海区沿陆架海流较强时,可能出现较高的表层叶绿素  $a$  质量浓度。反之亦然。即二者呈现正相关。该 2 种要素的相关性甚至高于叶绿素  $a$  质量浓度与海面高度的相关性,不同年份中沿陆架海流流速与表层叶绿素  $a$  质量浓度最大相关系数可接近 0.6。海流输运携带来高营养物质海水是产生现象的一种原因。而且沿陆架海流较强时,可通过正压不稳定效应增强本海区的海洋混合,也可以使得下层营养物质进入上层海水,有助于提升表层叶绿素  $a$  质量浓度。

### 2.3.3 表层叶绿素 $a$ 与海面风场

南海大部分海区海面风场大小与表层叶绿素  $a$  季节内变化均成正相关(图 9)。图中白色网格区域同图 4,为相关性没有通过 95% 置信度检验区域。即当风场增大时,在四季季节内可能出现表层叶绿素  $a$  的对应增大。原因是当风场增大时海洋上层混合加强,进而使得次表层营养物质容易进入表层。

各类微生物在得到营养供应后,繁殖活跃,最终提升表层叶绿素  $a$  质量浓度。然而有 3 处例外:1)夏季海南岛东南外海风场强度和叶绿素  $a$  季节内变化相关性较低。对比季节内变化的特征,发现夏季这一海区表层叶绿素  $a$  季节内变化非常微弱(图 2),这使得其与风场的相关性较不显著。2)冬季吕宋海峡西侧海区,风场强度和叶绿素  $a$  季节内变化相关性也显著低于周边海区。冬季这一海区海洋上层混合强烈,除风场驱动外,正压、斜压不稳定等现象均加剧了海洋混合层变化。所以,局地风场可能并不是本海区叶绿素  $a$  季节内变化的主要因素。海洋动力调整和非局地因素在其中可起到重要作用。3)在南海东南边缘海区,秋冬季节局地风场大小和表层叶绿素  $a$  季节内变化也基本不存在相关性。这与表层温度和海面高度的相关分析所揭示的结果基本一致,进一步证实了研究海域表层叶绿素  $a$  质量浓度季节内变化应该不是由上升流、风场搅拌等因素导致的。

### 2.3.4 表层叶绿素 $a$ 与海面热通量

整个南海海面热通量与表层叶绿素  $a$  在季节内基本为正相关(图 10)。热通量的正方向为海洋向大气释放热量。因此当海洋加热大气的热传递异常时,季节内对应出现表层叶绿素  $a$  的增加。这一关系与叶绿素  $a$  和风应力大小季节内变化关系相一致。当风应力增大时,会导致由海洋进入大气的潜热通量增大。即当风应力增大时,会呈现海面热通量的相应增大、混合增强,也可对应表层叶绿素  $a$  季节内频段的升高。这一结果显示动力过程在研究海区海洋叶绿素  $a$  的变化过程中占据主导地位,热力过程较不重要。

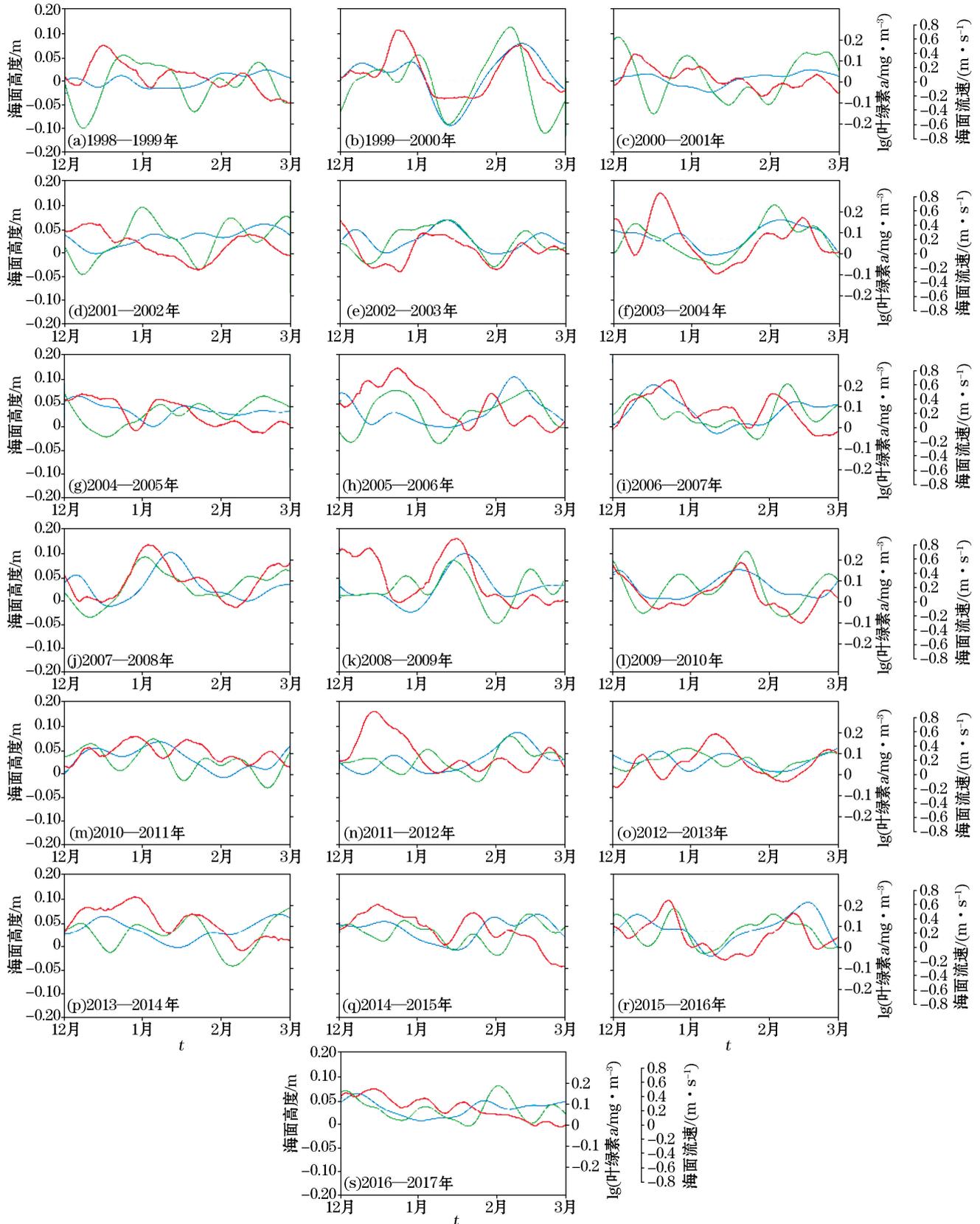


图 8 冬季(12月、1月和2月)南海东南边缘处季节内区域平均的海面高度(蓝色曲线)、表层叶绿素  $a$  质量浓度(绿色曲线)和沿陆架海流流速(红色曲线)随时间变化

Fig.8 Intraseasonal variations of the regionally averaged sea surface height (blue lines), the chlorophyll  $a$  concentration (green lines), and the current along shelves (red lines) in the winters (during December to the following February)

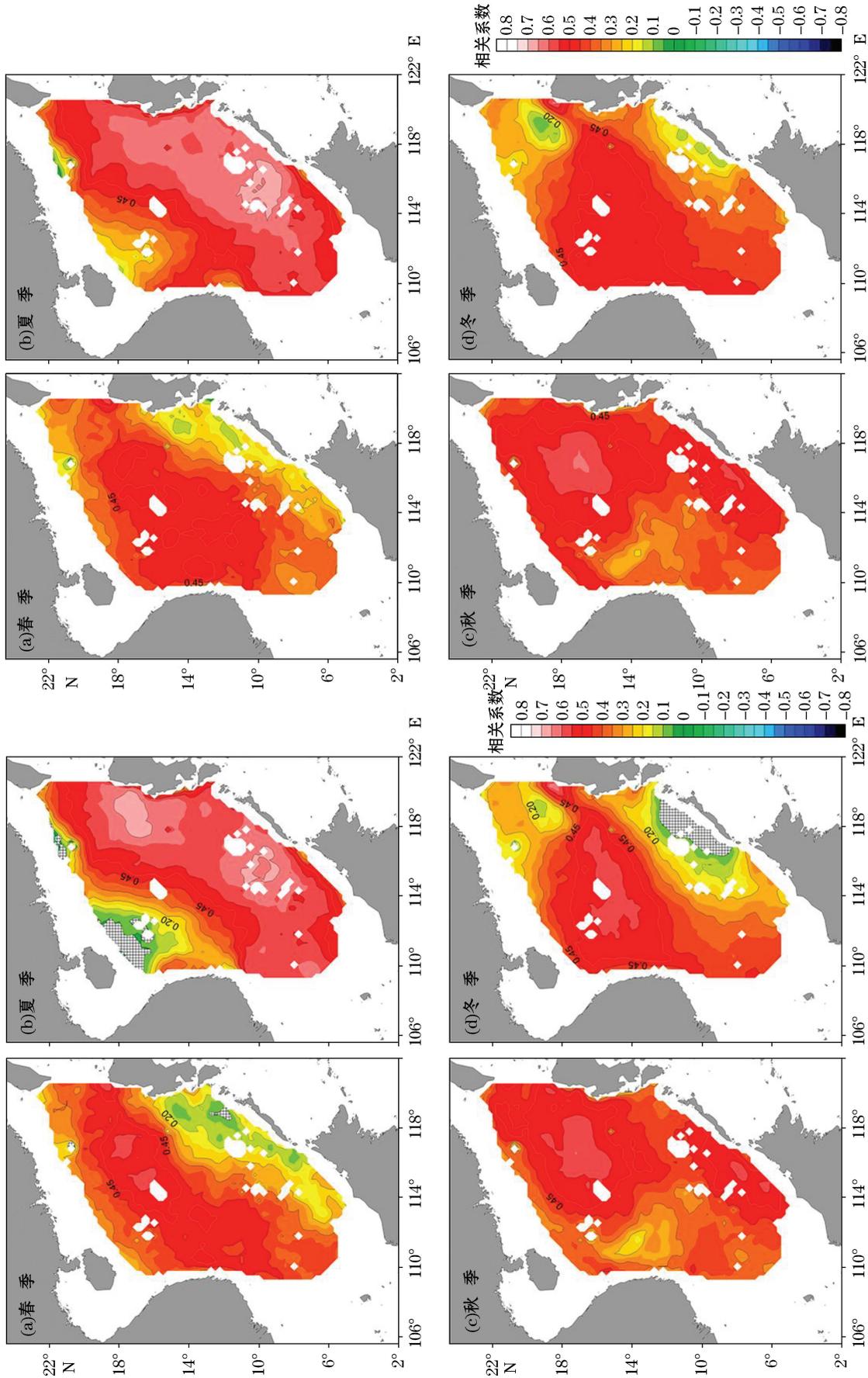


图9 南海及周边海区表层叶绿素 *a* 四季季节内变化与海面风场强度季节内变化相关系数分布

Fig.9 Distribution of the correlation coefficient between the intra-seasonal variation of chlorophyll *a* and the sea surface wind magnitude in the South China Sea and adjacent seas in 4 seasons

图10 南海及周边海区表层叶绿素 *a* 四季季节内变化与海面热通量季节内变化相关系数分布

Fig.10 Distribution of the correlation coefficient between the intra-seasonal variation of chlorophyll *a* and the sea surface heat flux in the South China Sea and adjacent seas in 4 seasons

## 4 结 论

依据 GlobColour 卫星遥感数据,我们证实了南海表层叶绿素  $a$  季节内变化存在显著的季节特征。其振荡总体来说存在冬强夏弱的特征,冬季南海振荡较强区位于北部,夏季则是南部震荡较强。

相关分析结果显示,表层叶绿素  $a$  质量浓度季节内变化和表层温度对应变化联系紧密。南海大部分海区二者均成负相关特征,相关系数冬强夏弱。夏季较高的背景温度是导致相关系数相对冬天较弱的原因之一。吕宋海峡西侧表层温度和表层叶绿素  $a$  质量浓度季节内变化关系紧密,这与中尺度涡旋、上升流或垂向混合加强等动力调整趋势一致。然而夏季越南离岸流海区表层温度却与叶绿素  $a$  季节内变化相关性不强,这显示海流运输也是导致温度和叶绿素  $a$  在季节内存在联系的控制因素之一。受噪声等因素干扰,海面高度季节内振荡和叶绿素  $a$  对应变化相关性不强。但南海东南边缘处为一例外,其海面高度和叶绿素  $a$  在季节内频段呈正相关。海盆尺度的环流结构可能是导致这一现象的原因之一。进一步与沿陆架海流速度的相关分析也证实了这一推测。即冬季南海内逆时针旋转的环流增强,可能是由南面携带更多营养丰富的陆架水进入目标海区,使得该海区叶绿素  $a$  在对应时间段内出现升高。风场和热通量相关分析结果与以上结论一致,即海洋动力调整过程在吕宋海峡西侧和南海东南边缘对表层叶绿素  $a$  季节内变化起到重要作用。

通过研究分析我们认为在南海北部吕宋海峡西侧海区,海洋上层混合、黑潮入侵等现象可能与叶绿素  $a$  季节内变化关系密切。而南海东南边缘处除了环流运输携带之外,陆架波和地形共同控制的跨陆架海水运输也可能对叶绿素  $a$  季节内变化造成影响,使得该海区海面高度和海流大小与叶绿素  $a$  对应变化呈正相关。目前非常有必要深入开展对于南海海区表层叶绿素  $a$  季节内变化的控制机制的进一步细致分析。

### 参考文献(References):

- [1] GAO R, ZHOU F X. Monsoonal characteristics revealed by intraseasonal variability of sea surface temperature (SST) in the South China Sea (SCS)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(8): 631-634.
- [2] MAO J Y, CHAN J C. Intraseasonal variability of the South China Sea summer monsoon[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(7): 2388-2402.
- [3] ZHUANG W, XIE S P, WANG D X, et al. Intraseasonal variability in sea surface height over the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C4): 1-14.
- [4] TANG S, LIU F, CHEN C. Seasonal and intraseasonal variability of surface chlorophyll  $a$  concentration in the South China Sea[J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2014, 17(3): 242-251.
- [5] MCGILLICUDDY D J, ANDERSON L A, BATES N R, et al. Eddy/wind interactions stimulate extraordinary mid-ocean plankton blooms[J]. *Science*, 2007, 316(5): 1021-1026.
- [6] CHE B, XIONG T. Impact of South China Sea dispute on fishery and countermeasures[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2009, 30(4): 414-418. 车斌, 熊涛. 南海争端对我国南海渔业的影响和对策[J]. *农业现代化研究*, 2009, 30(4): 414-418.
- [7] LI Z F, LÜ S J. Discussion of current conditions of fishery industry in the South China Sea and cooperations with Association of South-east Asian Nations[J]. *Marine and Fishery Industry*, 2013, 236(12): 42-45. 黎祖福, 吕慎杰. 南海渔业产业现状及与东盟周边国家合作机制探讨[J]. *海洋与渔业*, 2013, 236(12): 42-45.
- [8] JI S J, ZHOU W F, CHENG T F, et al. On the forecast and analysis of fishing grounds in the open South China Sea[J]. *Fishery Information & Strategy*, 2015, 30(2): 98-105. 纪世建, 周为峰, 程田飞, 等. 南海外海渔场渔情分析预报的探讨[J]. *渔业信息与战略*, 2015, 30(2): 98-105.
- [9] SHI X Y, LI H M, HAN X R, et al. Influence of typical mesoscale oceanographical process on the distribution of nutrients and dissolved oxygen in the northern part of South China Sea in summer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(3): 695-703. 石晓勇, 李鸿妹, 韩秀荣, 等. 夏季南海北部典型中尺度物理过程对营养盐及溶解氧分布特征的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(3): 695-703.
- [10] XIU P, CHAI F. Modeled biogeochemical responses to mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*:

- Oceans, 2011, 116(C10): 1-16.
- [11] GUO M, CHAI F, XIU P, et al. Impacts of mesoscale eddies in the South China Sea on biogeochemical cycles[J]. *Ocean Dynamics*, 2015, 65(8): 1335-1352.
- [12] LIN J, CAO W X, WANG G F, et al. Satellite-observed variability of phytoplankton size classes associated with a cold eddy in the South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 83(1): 190-197.
- [13] CHEN G X, XIU P, CHAI F. Physical and biological controls on the summer chlorophyll bloom to the east of Vietnam[J]. *Journal of Oceanography*, 2014, 70(3): 323-328.
- [14] HUANG B Q, HU J, XU H Z, et al. Phytoplankton community at warm eddies in the northern South China Sea in winter 2003/2004 [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(10): 1792-1798.
- [15] LI J M, QI Y Q, JING Z Y, et al. Enhancement of eddy-Ekman pumping inside anticyclonic eddies with wind-parallel extension: Satellite observations and numerical studies in the South China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, 132 (4): 150-161.
- [16] LIU F F, TANG S L, CHEN C Q. Impact of nonlinear mesoscale eddy on phytoplankton distribution in the northern South China Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 123(8): 33-40.
- [17] HE Q Y, ZHAN H G, CAI S Q, et al. Eddy effects on surface chlorophyll in the northern South China Sea; mechanism investigation and temporal variability analysis[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2016, 112 (6): 25-36.
- [18] LENG X Y, YANG Y, SUN J, et al. Mesoscale physical processes on the effects of distribution of nutrients and chlorophyll *a* in the western South China Sea in summer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(4): 66-75. 冷晓云, 杨阳, 孙军, 等. 夏季南海西部中尺度物理过程对营养盐和叶绿素 *a* 分布特征的影响[J]. *海洋学报*, 2016, 38(4): 66-75.
- [19] YANG D, YE H, WANG G. Impacts of internal waves on chlorophyll *a* distribution in the northern portion of the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(5): 1095-1101.
- [20] LOISEL H, VANTREPOTTE V, OUILLON S, et al. Assessment and analysis of the chlorophyll-*a* concentration variability over the Vietnamese coastal waters from the MERIS ocean color sensor (2002—2012)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190(3): 217-232.
- [21] HE Q Y, ZHAN H G, CAI S Q, et al. A new assessment of mesoscale eddies in the South China Sea: surface features, three-Dimensional structures, and thermohaline transports[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(7): 4906-4929.
- [22] YÜ L, XIONG X J, GUO Y L, et al. Analysis of the path and axis features of the Kuroshio at the depth of 15 m based on drifting buoy data[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(3): 316-323. 于龙, 熊学军, 郭延良, 等. 根据漂流浮标资料对黑潮 15 m 层流路及流轴特征的分析[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(3): 316-323.
- [23] MARITORENA S, D'ANDON O H F, MANGIN A, et al. Merged satellite ocean color data products using a bio-optical model: characteristics, benefits and issues[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(8): 1791-1804.
- [24] REYNOLDS R W, SMITH T M, LIU C, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(11): 5473-5496.
- [25] Copernicus Marine Environment Monitoring Service. SSALTO/DUACS MSLA and (M)ADT near-real time and delayed time products [DB/OL]. [2020-03-12]. <https://www.avisio.alltimetry.fr/>. Brussels, Belgium.
- [26] KALNARY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-471.
- [27] HOLTE J, TALLEY L D, GILSON J, et al. An Argo mixed layer climatology and database[J]. *Geophysical Research Letter*, 2017, 44 (5): 5618-5626.
- [28] National Oceanic and Atmospheric Administration. World Ocean Atlas 2013[DB/OL]. [2020-03-12]. <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>.
- [29] WANG J Y, FANG G H, WANG Y G. Trends and interannual variability of the South China Sea surface winds, surface height and surface temperature in the recent decade[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 159-175. 王佳莹, 方国洪, 王永刚. 南海海面风场、高度场和温度场近十年的变化趋势及年际变化特征[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 159-175.

## Features and Driving Mechanisms of the Intra-seasonal Variation of Sea Surface Chlorophyll $a$ in the South China Sea

LIAN Zhan<sup>1,2</sup>, WANG Xin-yi<sup>1,2</sup>, WEI Ze-xun<sup>1,2</sup>

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)*

**Abstract:** The study of intra-seasonal variation of sea surface chlorophyll  $a$  in the South China Sea (SCS) is helpful to promote the understanding of regional oceanic characteristics and the forecasting of fish activity information. Based on satellite data, this study analyzes the intra-seasonal variation in different seasons in the SCS, and finds that the magnitude of intra-seasonal variation of sea surface chlorophyll  $a$  is the highest in winter. In winter and spring, the regions with strong intra-seasonal variation are located to the north-west of the Luzon Island. In summer and fall, the regions with strong variation are shifted to the vicinity of the Philippine Islands. Correlation analysis shows that there is a tight relation between the intra-seasonal variation of sea surface temperature and the sea surface chlorophyll  $a$ , which is negative, and more significant in winter than in summer. In most regions, the correlation between the intra-seasonal variation of sea surface height and the sea surface chlorophyll  $a$  is not significant, but in the south-eastern rim of the SCS basin the correlation is positive. The above-mentioned features are likely caused by the anticlockwise basin scale circulation in winter. Analysis also shows that, except for the south-eastern rim of the SCS, the area to the south-east of the Hainan Island, and that to the west of the Luzon Island, magnitude of wind stress and sea surface heat flux are positively correlated with the sea surface chlorophyll  $a$  intra-seasonal time scale. Our study indicates that non-local factors and ocean dynamical adjustments might play an important role in the intra-seasonal variation of sea surface chlorophyll  $a$  in the region to the west of Luzon Island and in the south-eastern rim of the SCS basin.

**Key words:** the South China Sea; sea surface chlorophyll  $a$ ; intra-seasonal variation

**Received:** August 19, 2019