

古园园,王静,储小青,等. 夏季南海西部叶绿素浓度高值带的年际变化[J]. 海洋学报, 2017, 39(6): 1—9, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2017.06.001

Gu Yuanyuan, Wang Jing, Chu Xiaoqing, et al. Interannual variability of the high chlorophyll *a* concentration strip in the western South China Sea during summer[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(6): 1—9, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2017.06.001

夏季南海西部叶绿素浓度高值带的年际变化

古园园^{1,2}, 王静^{1*}, 储小青², 程旭华²

(1. 中山大学 地理科学与规划学院 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广东 广州 510275; 2. 中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室, 广东 广州 510301)

摘要: 基于 1998—2013 年 SeaWiFS 和 MODIS 传感器的叶绿素浓度资料, 本文分析了夏季南海西部叶绿素浓度高值带的年际变化规律。夏季, 叶绿素及营养盐在海流的作用下离岸输送, 从而在南海西部形成叶绿素浓度高值带, 其分布与东向急流的流向一致。分析结果显示, 高值带分布主要受 13°N 以南海域风场的调控, 且滞后风场 1 周。当 13°N 以南海域受异常东北风(西南风)控制时, 高值带位于其多年平均位置以北(南)。

关键词: 叶绿素; 叶绿素浓度高值带; 年际变化; 风场

中图分类号: P731.2; Q178.53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2017)06-0001-09

1 引言

南海是西北太平洋最大的半封闭边缘海, 其东西跨度 99°~122°E, 南北跨度 0°~23°N。南海位于亚澳季风的中部, 属于典型的季风区, 夏季盛行西南季风, 冬季盛行东北季风^[1-2]。夏季, 受安南山脉的阻挡, 南海西部的西南季风风速急剧增大, 强风的搅拌作用以及沿岸上升流导致的低温水和营养盐的上涌为该海域叶绿素浓度的升高提供了有利条件^[3-8]。受季风和地形的影响, 南海西部上层环流大致以 11°N 为分界线, 分界线以北海域出现气旋式环流, 以南出现反气旋式环流, 并在两者之间形成一支离岸东向急流^[9-12]。海水中的营养盐作为制约叶绿素浓度变化的主要因素, 其分布受海流状况的影响, 因此叶绿素浓度的分布也与海流密切相关^[13-14]。在东向急流的作用下, 营养盐和浮游植物离岸输送, 尽管浮游植物

的生命周期仅 1 周左右, 但在营养盐充足等条件下, 南部反气旋环流北部边缘的叶绿素一直保持较高浓度, 并形成呈离岸延伸状的叶绿素浓度高值带^[4-7, 15], 其浓度呈现近岸高离岸低的特点, 结合同期地转流场, 可以发现, 高值带的离岸分布与东向急流流向的一致性较好(图 1)。此外, 从叶绿素浓度高值带的存在周期来看, 高值带基本形成于 6 月, 7—8 月最强, 10 月因西南季风、沿岸上升流及反气旋环流减弱等因素引起的营养盐匮乏而消亡^[5]。

南海西部作为南海叶绿素浓度变化最为显著的海域之一^[16], 通常年份, 该海域的叶绿素浓度在夏季达到全年峰值^[4-8], 但 1997/1998 年强 El Niño 的出现, 造成翌年夏季南海西南季风减弱, 因此 1998 年该海域叶绿素浓度在夏季并未出现峰值^[4, 17-18]。研究表明, 印度洋“电容器效应”是造成 El Niño 翌年南海西南季风减弱的主要原因^[19-23], 而对于某些年份来

收稿日期: 2016-06-27; 修订日期: 2017-03-10。

基金项目: 国家自然科学基金(41276108, 41676010, 41476011, 41522601, 41276025); 广州市珠江科技新星项目(201506010036)。

作者简介: 古园园(1991—), 女, 江西省赣州市人, 主要从事海洋遥感信息应用研究。E-mail: yuan_8069@163.com

* 通信作者: 王静, 主要从事海洋遥感信息应用研究、GIS 研究。E-mail: jwang@scsio.an.cn

说,如 2000—2002 年及 2007 年,夏季由于受 30~60 d 变化周期的大气季节内振荡(Madden-Julian Oscil-

lation, MJO)影响,西南季风突增,造成越南东南沿岸上升流增强,导致该海域叶绿素浓度异常升高^[24-25]。

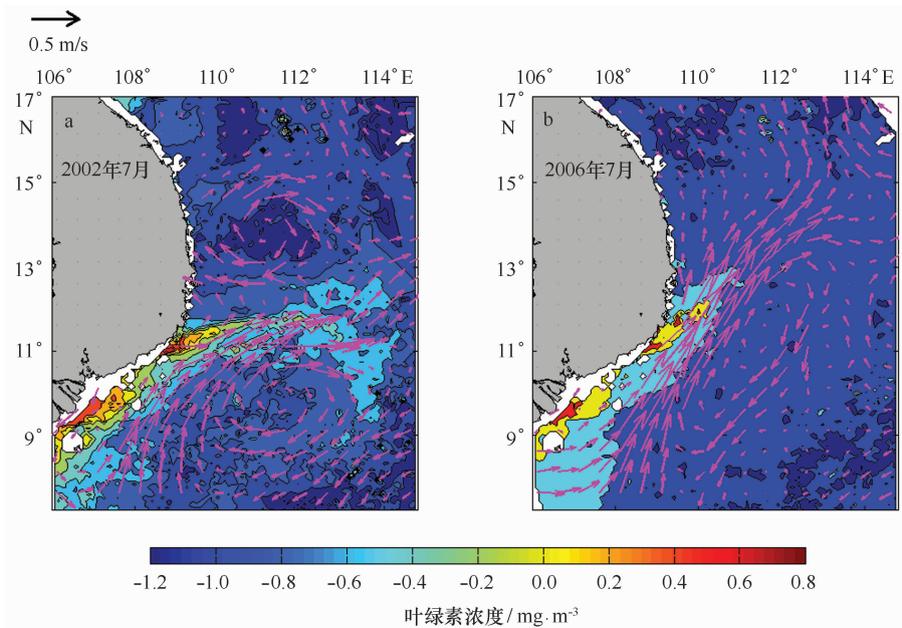


图 1 2002 年 7 月(a)与 2006 年 7 月(b)叶绿素浓度(mg/m^3 , 底色)及地转流分布(m/s , 紫色箭头)

Fig. 1 Maps of Chl *a* concentration(mg/m^3 , color shading) and geostrophic current(m/s , vectors), with (a) in July 2002, (b) in July 2006

由上述可知,前人对南海西部海域叶绿素浓度在不同时间尺度的变化及其与各海洋环境因子、ENSO (El Niño / Southern Oscillation)、MJO 等气候模态相互关系做了大量研究,但对叶绿素浓度高值带空间分布特征的分析鲜有涉及。而由图 1 给出的 2002 年及 2006 年 7 月的高值带分布状况来看,2002 年 7 月高值带呈东向离岸分布,2006 年 7 月高值带则呈东北向离岸分布,由此可见,不同年份的高值带分布存在较大差异。随着近年来海洋遥感资料的不断丰富,分析较长时间序列的叶绿素浓度及其他影响因子的变化已成为可能。基于以上考虑,本文以 Sea viewing Wide Field of view Sensor (SeaWiFS) 和 Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) L3 级标准产品为数据源,分析了夏季 $7^{\circ}\sim 17^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 之间的南海西部海域(图 2 黑框)叶绿素浓度高值带分布的年际变化规律,并初步探讨其可能的影响机制,这对于认识南海区域海洋生态系统及其与海洋物理环境的关系具有重要意义。

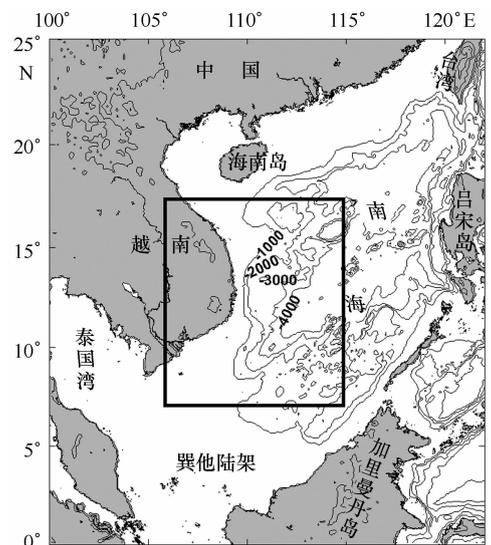


图 2 南海地形图,黑框所示为研究海域($7^{\circ}\sim 17^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$)

Fig. 2 Topography of the South China Sea, the black box indicates the study area ($7^{\circ}\sim 17^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$)

2 资料来源及处理方法

本文采用来自 NASA Goddard Space Flight Center Distributed Active Archive(GSFDAA)的 SeaWiFS 传感器和 MODIS 传感器叶绿素浓度资料,空间分辨率为 $9\text{ km}\times 9\text{ km}$,时间分辨率为 8 d ,取 1998 年到 2013 年 7 月的 8 日平均叶绿素浓度数据,其中,1998 年到 2007 年使用 SeaWiFS 传感器数据,由于 2007 年之后,SeaWiFS 数据缺失较大,因此从 2008 到 2013 年使用具有同样时空分辨率的 MODIS 数据。同时,为保持数据的连续性,利用关系式:

$$[chl]_{\text{SeaWiFS}} = 0.942 [chl]_{\text{MODIS}} + 0.021^{[26]}. \quad (1)$$

将 MODIS 传感器数据转化为以 SeaWiFS 传感器数据为基准的数据。绘图时,叶绿素浓度值取以 10 为底的对数,并去除水深 20 m 以浅的数据。

本文使用的海面风场数据是由欧洲中尺度天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,ECMWF)提供的大气、陆地和海洋全球再分析数据,时间分辨率为 1 d ,空间分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$,时间跨度为 1998 年到 2013 年。基于研究结果(见下文),将风速处理成与叶绿素浓度数据时间段对应的 8 日平均风场(例如选取 1998 年 7 月 20—27 日的叶绿素分布,那么对应的风场则是 1998 年 7 月 13—20 日期间的平均分布)。异常风速是通过减去对应月份的气候态月平均风速得到。

为研究叶绿素浓度与海表温度的关系,本文同样使用 ECMWF 提供的大气、陆地和海洋全球平均再分析数据,空间分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$,时间分辨率为 1 月 ,时间跨度为 1998 年 1 月到 2013 年 12 月。

文中采用的表面地转流资料来自法国 Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data(AVISO)提供的格点化产品,时间分辨率为 1 d ,空间分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$,时间自 1998 年到 2013 年,处理过程类似对风场的处理。

此外,MJO 指数由澳大利亚气象局(Australian Government Bureau of Meteorology)提供。

3 结果与分析

3.1 高值带的年际变化特征

在分析高值带的年际变化时,需排除季节和季节内等较短时间尺度信号的干扰,但由于叶绿素浓度数据缺测较多,无法直接利用带通滤波来滤除叶绿素浓度数据短时间尺度的信号,鉴于南海西部海域叶绿素

浓度高值带离岸分布与东向急流流向的一致性^[13-14],首先对地转流场数据进行滤波处理,使用 butterworth 低通滤波滤去 120 d 以下的季节内和季节变化信号,获得仅保留年际变化信号的地转流场,利用此流场来反映叶绿素浓度在年际尺度上的变化。

通常来说,叶绿素浓度高值带位置较稳定,并且在 7 月最为明显,因此,本文选用了 1998—2013 年逐 7 月份 8 d 合成的叶绿素浓度数据来代表夏季叶绿素浓度的分布,数据的选取上,在数据量样本足以反映高值带分布状况的前提下尽量保证每年所选数据时间段的一致性。由逐年 7 月份 8 d 合成的叶绿素浓度分布及同期已滤去季节和季节内等信号的地转流场(图 3),可以看出,除 2000 年以外,其余年份高值带的离岸分布与对应位置地转流流向的一致性较好,可认为图中所示的叶绿素浓度分布为年际信号,而在 2000 年 7 月 19—26 日期间,高值带呈东向离岸分布而东向急流流向东北,二者明显不一致,这可能是由于更小时间尺度信号的影响^[24-25],对此我们将另行撰文分析。

图 4 给出了研究区域 7 月份平均叶绿素浓度、风速、温度随时间的变化序列及叶绿素与两者之间的相关系数,通过分析发现,1998 年、2004 年、2005 年、2007 年、2010 年、2013 年南海西部海域的叶绿素浓度并未明显升高,其中,2004 年、2007 年、2010 年可能是受 2003 年、2006 年、2009 年 El Niño 的影响,翌年夏季区域平均风速低于 4 m/s ,根据图 4 中三者随时间的变化序列,求得叶绿素浓度与纬向风速的相关系数为 0.76,与温度的相关系数为 -0.74 ,但是因为样本数量较少,本文结合前人研究成果,用计算得到的相关系数来表明海表温度及风速对叶绿素浓度的影响。由图 4 同时结合前人研究结果可知,西南季风的减弱,导致沿岸上升流、海水蒸发及海水搅拌作用的减弱及海表温度的上升,从而抑制了叶绿素浓度的升高,区域平均浓度未超过 0.3 mg/m^3 ,因此,南海西部海域并未出现叶绿素浓度高值带^[4,17-18]。2013 年虽然未受到 El Niño 的影响,但西南季风较弱,南海西部叶绿素浓度较低,也未形成高值带。而 1998 年、2005 年分别受 1997 年、2004 年 El Niño 影响,南海西部叶绿素浓度明显较其余年份低,但在 7 月 20—27 日期间形成了高值带,而夏季的其余时间段南海西部叶绿素浓度较低且高值带未形成。因此,本文对 2000 年、2004 年、2007 年、2010 年及 2013 年这些特殊年份不予考虑。

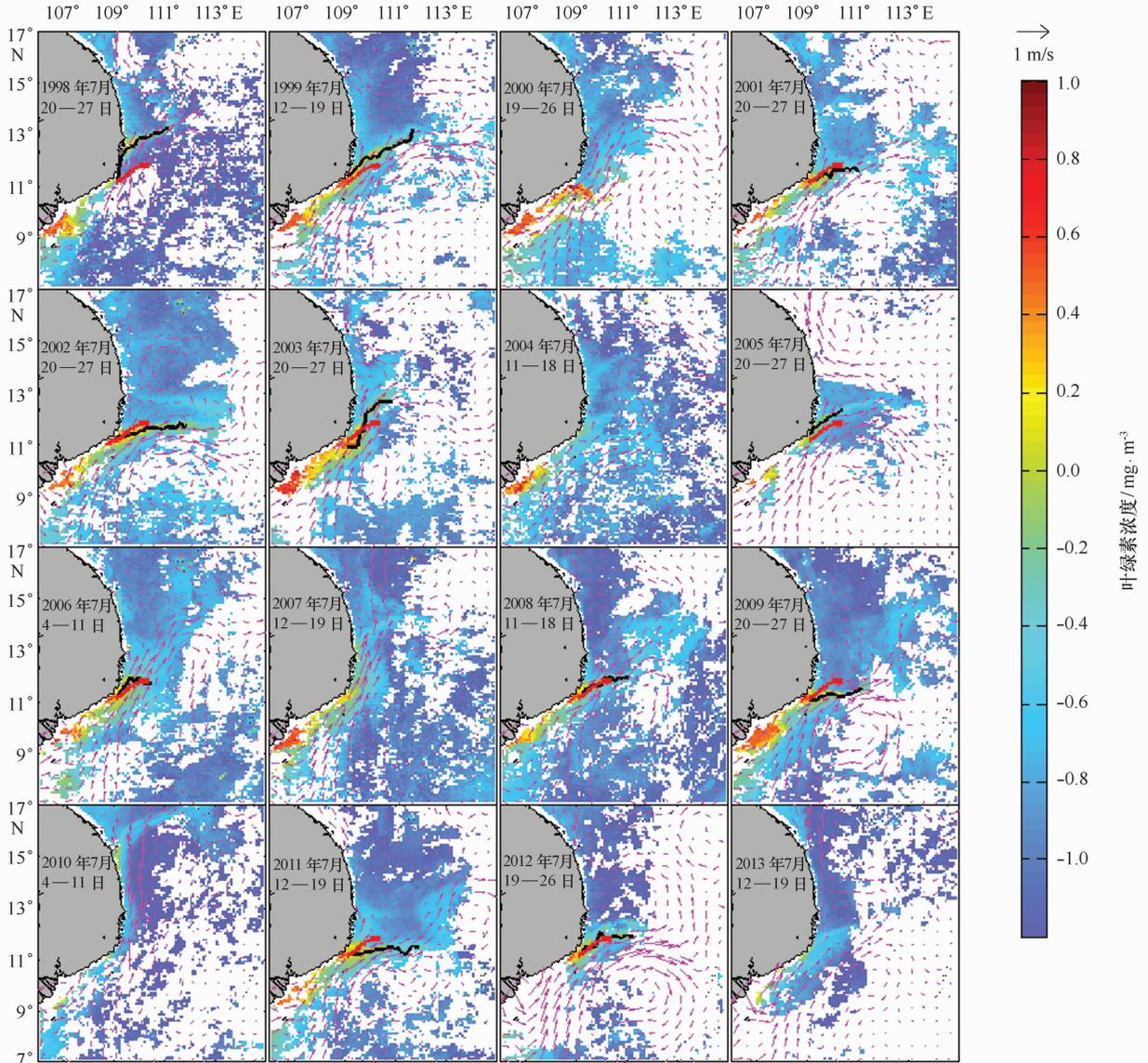


图 3 1998—2013 年逐年 7 月份 8 d 平均叶绿素浓度(mg/m^3)及滤波之后的地转流(m/s)

Fig. 3 8-day averaged Chl *a* concentration (mg/m^3) and low-pass filtered geostrophic current (m/s , vectors) in July from 1998 to 2013

底图颜色为叶绿素浓度,箭头表示地转流,黑线表示高值带位置,红线表示高值带多年平均位置

Black lines represent the location of high Chl *a* concentration strip, and red ones represent averaged location of it

为了便于分析叶绿素浓度高值带的年际变化,首先要确定高值带的主轴。主轴的确定方法如下:不考虑湄公河口由于近岸陆源性营养盐含量丰富所致的叶绿素浓度高值区,从 109°E 起,依次连接经向叶绿素浓度最大值所在格点,并以叶绿素浓度值不低于且最接近 $0.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ 的格点为终点,从而得到高值带的主轴(图 3 中黑线所示)。通过观察主轴位置的变化,可以看出,每年 7 月叶绿素浓度高值带分布不尽相同,存在明显的年际变化,如在 1998 年、1999 年、

2003 年、2005 年等年份,高值带位于其多年平均位置(图 3 中红线所示)以北,且从 11°N 附近的越南东南近岸处起,向东北离岸方向延伸至 13°N 左右;而在 2009 年、2011 年,高值带位于其多年平均位置以南,起始点也位于 11°N 附近的越南东南近岸,基本呈东向离岸分布,其余年份如 2008 年、2012 年,高值带位置与其多年平均位置几乎重合,不存在南北向的偏移。

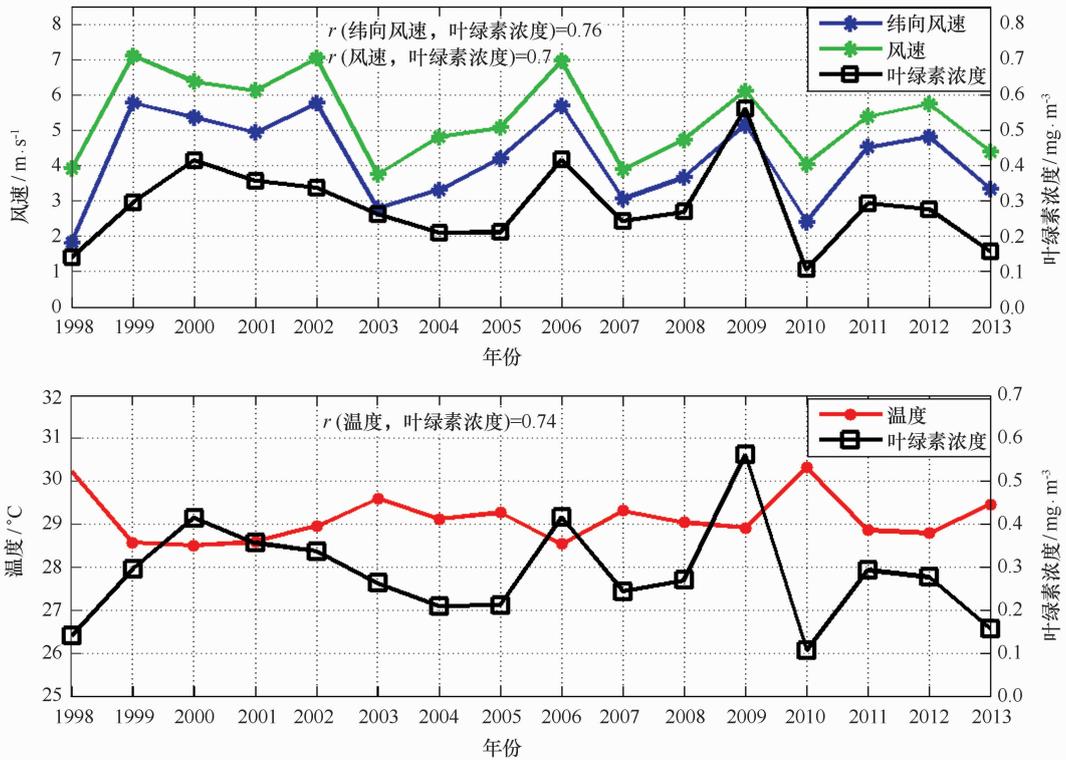


图4 1998—2013年7月份研究海域平均叶绿素浓度(黑线)、风速(绿线)、纬向风速(蓝线)、海面温度(红线)及变化序列

Fig. 4 Time series of averaged Chl *a* concentration (black line), wind (green line), and sea surface zonal wind (blue line), SST (red line) in July from 1998 to 2013

3.2 海面风场

在不同时空尺度大气振荡的叠加影响下,夏季南海西南季风强度在不同年份差异较大^[27-28],而南海环流主要受风的驱动^[29-31]。近年来,有学者通过分析数值模式结果及卫星遥感资料,进一步指出夏季东向急流的纬度位置因季风强度的不同而表现出明显的年际变化特征:当异常风场为西南风时,东向急流位置偏南;当异常风场为东北风时,东向急流位置偏北^[32-33],虽然较早期有研究指出,南海西部东向急流的流向与叶绿素浓度的分布密切相关^[12-13],但是,研究成果并未涉及夏季南海西部叶绿素浓度高值带分布的变化规律。在前文的分析中,已发现高值带分布存在明显的年际变化特征,我们猜测高值带的分布是否也会与夏季风的强度有所关联,因此,本节将分析夏季南海西部叶绿素浓度高值带分布的年际变化与风场的变化特征。

图5所示为高值带的平均纬度位置及研究海域超前7 d的平均纬向风速,我们可以发现,二者年际变化显著,且呈明显的负相关关系。具体来看,当叶绿素浓度高值带的纬度位置偏北时,如在1998年、

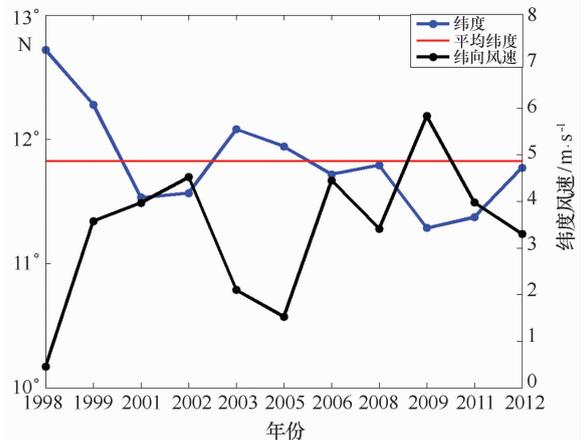


图5 高值带平均位置纬度时间序列(蓝色线段)与研究海域超前7 d的平均纬向风速时间序列(黑色线段),直线分别表示平均位置纬度和纬向风速的趋势变化;红色实线表示高值带多年平均位置的纬度值
Fig. 5 Time series of mean latitude of the high Chl *a* concentration strip (solid blue segment) and the zonal wind speed (m/s) leading 7 days (solid black segment); the red line is the climatological mean latitude of the high Chl *a* concentration strip

1999年、2003年、2005年夏季,对应超前7 d的纬向风速较弱,而在2009、2011年高值带纬度位置偏南,对应超前7天的纬向风速较强。

3.3 高值带与风场的关系

为进一步探究叶绿素浓度高值带的年际变化与风场的关系,本文选取了典型年份的风场进行合成分析。典型年份的选取方法如下:计算高值带与其多年平均位置在同一列上对应格点距离差值的总和,正值表示高值带位于其多年平均位置以北,负值表示高值带位于其多年平均位置以南(如图6所示),分别以 $\pm 0.44 \times 10^3$ km(绝对值为一个标准差)为阈值,当差值总和大于 0.44×10^3 km时,该年即为高值带北偏明显的年份,而总和小于 -0.44×10^3 km的年份则作为高值带南偏明显的年份。据此方法,我们选取了

1998年、1999年、2003年、2005年作为高值带位于其多年平均位置以北的典型年份,2009年和2011年作为高值带位于其多年平均位置以南的典型年份。对于典型年份,分析超前叶绿素浓度7 d的合成异常风场(图7),可以发现,南海西部海域海表异常风场大致以 13°N 为分界线,分界线的南北两侧表现出不同特征,对于高值带明显偏北的年份, 13°N 以南海域基本受异常东北风控制,由1998年、1999年、2003年、2005年异常风场合成见图7a, 13°N 以南海域呈东北风异常, 13°N 以北的大部分海域呈西南风异常;对于高值带偏南的年份, 13°N 以南海域均呈现西南风异常,2009年和2011年的异常风场合成见图7b,全区均呈现西风异常, 13°N 以南海域呈西南风异常, 13°N 以北海域呈西北风异常。

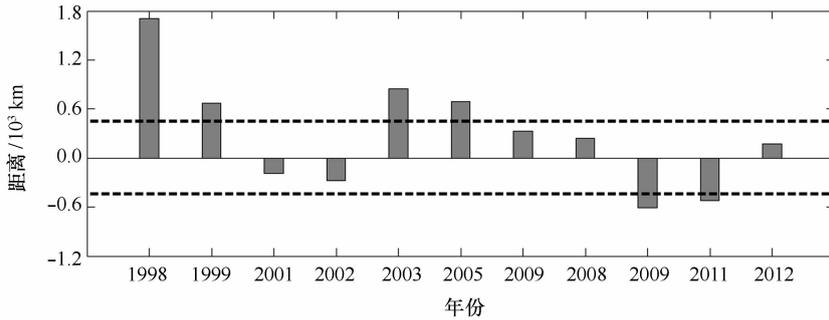


图6 叶绿素含量高值带位置与其多年平均位置差值总和的时间序列

Fig. 6 Time series of the sum of the distances between the high Chl *a* concentration strip and its multi-year mean location

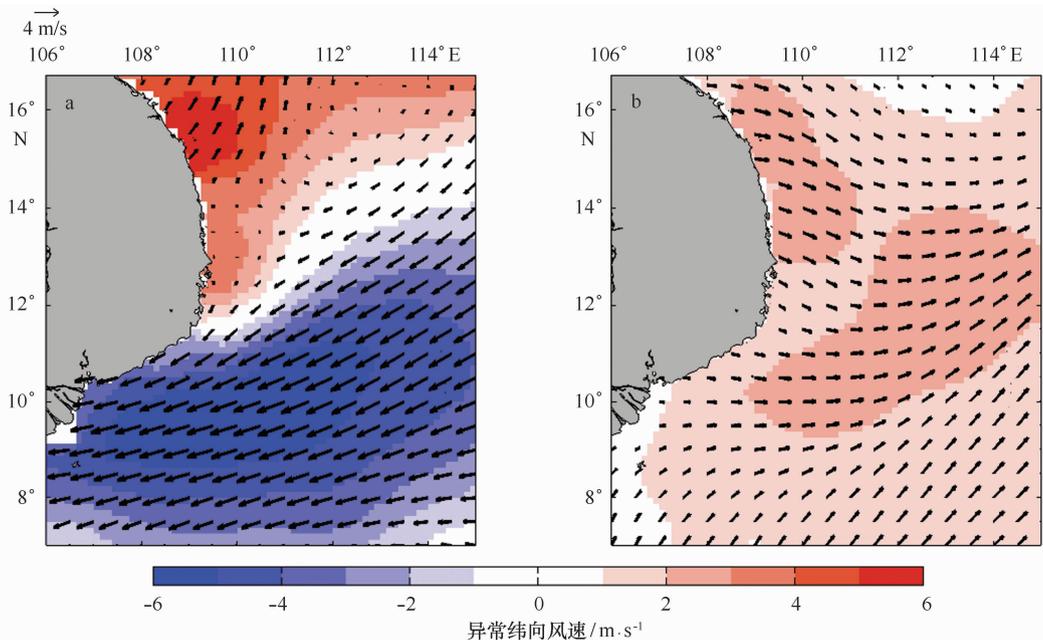


图7 叶绿素含量高值带偏北年份(a)和偏南年份(b)异常风场合成,其中底图颜色表示异常纬向风速(m/s)

Fig. 7 Composites of wind anomalies in the year when the high Chl *a* concentration strip moves north (a), south(b); shading color represents the zonal wind anomalies (m/s)

由以上分析可以推断,叶绿素浓度高值带位置主要受 13°N 以南海域风场的影响。因此,风场对叶绿素浓度高值带分布年际变化的影响可概括如下:当高值带分布滞后纬向风速 7 d 时,二者呈现明显的负相关关系;当 13°N 以南海域纬向风速减小、且全区呈东北风异常时,高值带位于其多年平均位置以北;当 13°N 以南海域纬向风速增强,且全区呈西南风异常时,高值带位于其多年平均位置以南。

4 结论

前人研究表明,夏季,西南季风增强、南海西部海域的沿岸上升流将营养盐垂向输送至海表,造成了研究海域叶绿素浓度的显著升高。离岸流、涡旋导致的表面流和埃克曼平流将携带大量浮游动植物及营养盐的水体水平输送,持续的营养盐供给及浮游动植物的生态效应,为南海西部海域叶绿素浓度高值带形成及分布的维持提供了极佳条件,而地转流则在此

过程中起主导作用^[14],因此地转流流向与高值带的分布吻合较好。此外,由于南海西部的东向急流是由海面高度变化形成的经向偶极子模态产生,而海面高度的偶极子模态主要受南海局部风场变化影响^[33]。因此,基于以上研究成果,我们在本文的分析中发现,叶绿素浓度高值带的分布存在一定的年际变化规律,并且这种变化与研究海域的纬向风速有关,总结如下:

叶绿素浓度高值带的年际变化主要受 13°N 以南海域纬向风速的影响,并滞后风场 7 d。当 13°N 以南海域受异常东北风的控制,高值带位于其多年平均位置以北;当 13°N 以南海域受异常西南风的控制,高值带位于其多年平均位置以南。可通过图 8 所示的概念模型来具体反映:当研究海域 13°N 以南纬向风速增强,在东向急流的作用下,所形成的高值带位置南偏,当 13° 以南纬向风速减弱,东向急流流向东北,高值带位置北偏。

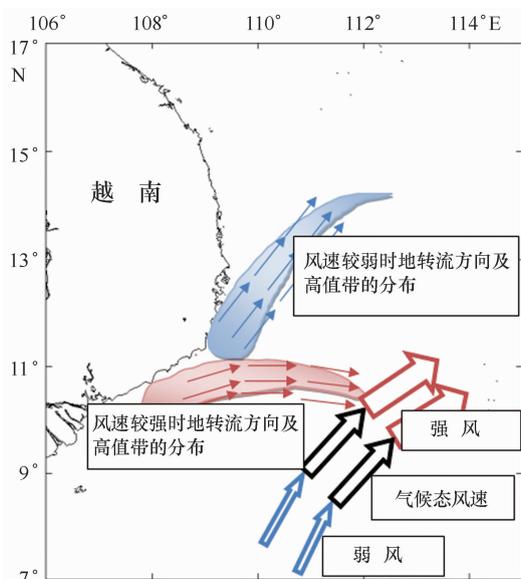


图 8 叶绿素浓度高值带分布及机制的概念模型

Fig. 8 Conceptual model of the mechanism for the high Chl a concentration strip's location

参考文献:

- [1] 杜岩. 南海混合层和温跃层的季节动力过程[D]. 青岛: 青岛海洋大学, 2002.
Du Yan. Seasonal dynamic process of the mixed layer and the thermocline in the South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of Qingdao, 2002.
- [2] Wyrtki K. Physical oceanography of the southeast Asian waters[R]. La Jolla, California: Scripps Institution of Oceanography, the University of California, 1961.
- [3] Kuo N J, Zheng Quan'an, Ho C R. Satellite observation of upwelling along the western coast of the South China Sea[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(3): 463-470, doi: 10.1016/S0034-4257(00)00138-3.

- [4] Xie Shangping, Xie Qiang, Wang Dongxiao, et al. Summer upwelling in the South China Sea and its role in regional climate variations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C8): 3261, doi: 10.1029/2003JC001867.
- [5] Tang Danling, Kawamura H, Van Dien T, et al. Offshore phytoplankton biomass increase and its oceanographic causes in the South China Sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, 268: 31–41.
- [6] Tang Danling, Kawamura H, Shi Ping, et al. Seasonal phytoplankton blooms associated with monsoonal influences and coastal environments in the sea areas either side of the Indochina Peninsula[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(G1): G01010, doi: 10.1029/2005JG000050.
- [7] 赵辉, 唐丹玲, 王素芬. 南海西北部夏季叶绿素 *a* 浓度的分布特征及其对海洋环境的响应[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(6): 31–37.
Zhao Hui, Tang Danling, Wang Sufen. Spatial distribution of chlorophyll *a* concentration in summer in western South China Sea and its response to oceanographic environmental factors[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(6): 31–37.
- [8] 赵辉, 齐义泉, 王东晓, 等. 南海叶绿素浓度季节变化及空间分布特征研究[J]. *海洋学报*, 2005, 27(4): 45–52.
Zhao Hui, Qi Yiquan, Wang Dongxiao, et al. Study on the features of chlorophyll *a* derived from SeaWiFS in the South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2005, 27(4): 45–52.
- [9] Fang Wendong, Fang Guohong, Shi Ping, et al. Seasonal structures of upper layer circulation in the southern South China Sea from in situ observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C11): 23-1–23-12, doi: 10.1029/2002JC001343.
- [10] Shaw P T, Chao S Y, Fu L L. Sea surface height variations in the South China Sea from satellite altimetry[J]. *Oceanologica Acta*, 1999, 22(1): 1–17.
- [11] Wu C R, Shaw P T, Chao S Y. Seasonal and interannual variations in the velocity field of the South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 1998, 54(4): 361–372.
- [12] Wu C R, Shaw P T, Chao S Y. Assimilating altimetric data into a South China Sea model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C12): 29987–30005.
- [13] 陈楚群, 施平, 毛庆文. 南海海域叶绿素浓度分布特征的卫星遥感分析[J]. *热带海洋学报*, 2001, 20(2): 66–70.
Chen Chuqun, Shi Ping, Mao Qingwen. Satellite remotely-sensed analysis of distribution characters of chlorophyll concentration in South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2001, 20(2): 66–70.
- [14] Chen Gengxin, Xiu Peng, Chai Fei. Physical and biological controls on the summer chlorophyll bloom to the east of Vietnam[J]. *Journal of Oceanography*, 2014, 70(3): 323–328.
- [15] Xie Shangping, Chang C H, Xie Qiang, et al. Intraseasonal variability in the summer South China Sea: wind jet, cold filament, and recirculations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C10): C10008, doi: 10.1029/2007JC004238.
- [16] 闫桐, 王静. 基于 HHT 的吕宋岛西北海域叶绿素浓度及相关环境物理要素的多时间尺度分析[J]. *热带海洋学报*, 2012, 30(5): 38–47.
Yan Tong, Wang Jing. Multi-timescale analysis of chlorophyll and its related physical factors northwest of the Luzon Island based on HHT[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 30(5): 38–47.
- [17] Zhao Hui, Tang Danling. Effect of 1998 El Niño on the distribution of phytoplankton in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C2): C02017.
- [18] Jing Zhiyou, Qi Yiquan, Du Yan. Upwelling in the continental shelf of northern South China Sea associated with 1997–1998 El Niño[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C2): C02033.
- [19] Xie Shangping, Hu Kaiming, Hafner J, et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(3): 730–747.
- [20] Du Yan, Xie Shangping, Huang Gang, et al. Role of air-sea interaction in the long persistence of El Niño-induced north Indian Ocean warming [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(8): 2023–2038.
- [21] Wang Chunzai, Wang Weiqiang, Wang Dongxiao, et al. Interannual variability of the South China Sea associated with El Niño[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C3): C03023.
- [22] Yang Jianling, Liu Qinyu, Liu Zhengyu. Linking observations of the Asian monsoon to the Indian ocean SST: possible roles of Indian ocean basin mode and dipole mode[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(21): 5889–5902.
- [23] Yang Jianling, Liu Qinyu, Xie Shangping, et al. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(2): L02708.
- [24] Isoguchi O, Kawamura H. MJO-related summer cooling and phytoplankton blooms in the South China Sea in recent years[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(16): L16615.
- [25] Liu Xin, Wang Jing, Cheng Xuhua, et al. Abnormal upwelling and chlorophyll *a* concentration off South Vietnam in summer 2007[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C7): C07021.
- [26] Liu K K, Wang L W, Dai M, et al. Inter-annual variation of chlorophyll in the northern South China Sea observed at the SEATS Station and its asymmetric responses to climate oscillation[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(11): 7449–7462.
- [27] 黄少妮. 南海夏季风爆发的多尺度特征及其可预报性[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
Huang Shaoni. Multi-scale features and predictability of South China Sea summer monsoon[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [28] 戴念军, 谢安, 张勇. 南海夏季风活动的年际和年代际特征[J]. *气候与环境研究*, 2000, 5(4): 363–374.
Dai Nianjun, Xie An, Zhang Yong. Interannual and interdecadal variations of summer monsoon activities over South China Sea[J]. *Climatic and*

Environmental Research, 2000, 5(4): 363–374.

- [29] 李立. 南海上层环流观测研究进展[J]. 台湾海峡, 2002, 21(1): 114–125.
Li Li. Advance in observational studies of upper layer circulations of the South China Sea[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2002, 21(1): 114–125.
- [30] Fang Wendong, Guo Zhongxin, Huang Yuting. Observational study of the circulation in the southern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(11): 898–905.
- [31] Shaw P T, Chao S Y. Surface circulation in the South China Sea[J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1994, 41(11/12): 1663–1683.
- [32] Chen Changlin, Wang Guihua. Interannual variability of the eastward current in the western South China Sea associated with the summer Asian monsoon[J]. Journal of Geophysical Research, 2014, 119(9): 5745–5754.
- [33] Li Yuanlong, Han Weiqing, Wilkin J L, et al. Interannual variability of the surface summer-time eastward jet in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 2014, 119(10): 7205–7228.

Interannual variability of the high chlorophyll *a* concentration strip in the western South China Sea during summer

Gu Yuanyuan^{1,2}, Wang Jing¹, Chu Xiaoqing², Cheng Xuhua²

(1. *Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*; 2. *State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*)

Abstract: Based on the SeaWiFS and MODIS chlorophyll *a* (Chl *a*) concentration data from 1998 to 2013, the interannual variability of the high Chl *a* concentration strip in the western South China Sea (SCS) during summer is investigated. In summer, under the effect of the eastward current, the Chl *a* and the nutrients are advected offshore into the open SCS, which contributes to forming the high Chl *a* concentration strip, whose distribution pattern seems in accord with the direction of the eastward current. Our analysis shows that in the study region, monsoon in the south of 13°N plays a significant role in determining the distribution of the chlorophyll with 1 week delay, and the interannual variability of wind anomaly results in the variability of the high chlorophyll concentration strip. When the area is controlled by anomalous northeast (southwest) monsoon, the strip moves northward (southward).

Key words: chlorophyll; the high Chl *a* concentration strip; interannual variability; wind