

高微, 马本俊. 北赤道逆流影响的热带西太平洋秋冬转换期海表叶绿素浓度与 ENSO 循环[J]. 海洋学报, 2024, 46(3): 12–21, doi:10.12284/hyxb2024008

Gao Wei, Ma Benjun. Response mechanism of the surface chlorophyll concentration to ENSO cycle influenced by North Equatorial Countercurrent during autumn and winter transition period in the tropical western Pacific[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(3): 12–21, doi:10.12284/hyxb2024008

北赤道逆流影响的热带西太平洋秋冬转换期海表叶绿素浓度与 ENSO 循环

高微¹, 马本俊^{2*}

(1. 青岛黄海学院, 山东 青岛 266427; 2. 哈尔滨工程大学 青岛创新发展基地, 山东 青岛 266427)

摘要: 在厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 的发生、发展中, 北赤道逆流也有明显的年际变化, 但北赤道逆流的变化如何影响海洋水文生态条件的变化过程尚不清楚。本文以位于热带西太平洋的北赤道逆流影响区为研究海区, 分析了 2006–2022 年 ENSO 循环期间研究区不同阶段秋冬转换期水文生态气候条件的变化特征。结果表明, 北赤道逆流源区及其路径上存在海表叶绿素浓度高值条带, 这是由北赤道逆流从其源区携带的和新几内亚海岸潜流携带的营养物质共同影响下形成的, 棉兰老冷穹上升流也会对其营养盐供给产生较大影响。厄尔尼诺事件发生时, 热带西太平洋西风事件增多, 北赤道逆流增强, 大量表层水东移, 研究区海平面降低, 深水向浅层补给增加, 深层冷水上抬, 共同增强的北赤道逆流、新几内亚海岸流、新几内亚海岸潜流和棉兰老冷穹上升流将更多的养分从水平和垂直层面输送到海面, 导致海面叶绿素浓度和原位有机碳总量显著增加。拉尼娜事件发生时, 北赤道逆流影响区生态水文气候条件变化与厄尔尼诺事件发生时的变化特征几乎相反, 但其变化程度弱于厄尔尼诺时期, 共同减弱的北赤道逆流、新几内亚海岸潜流和棉兰老冷穹上升流使从水平和垂直层面输送到海面的养分显著减少, 导致海面叶绿素浓度和原位有机碳总量显著降低。本文提出了北赤道逆流影响区水文生态气候条件演化对厄尔尼诺事件和拉尼娜事件的响应机制模型, 这有利于进一步分析 ENSO 循环在局地生态效应和水文气候演化中的作用, 对认识全球气候变化对物质循环的影响具有重要意义。

关键词: 北赤道逆流; 厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO); 海洋环境要素; 热带西太平洋

中图分类号: P731.26

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)03-0012-10

1 引言

热带西太平洋是南北半球洋流的交汇区, 是所谓的“全球大洋输送带”的重要组成部分, 高纬度形成的浅层水和中层水在此交汇^[1-2]。该海区同时也是西太

平洋暖池所在的海区, 存在非常活跃的海气相互作用, 在厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 事件的发生中扮演着重要角色。这些复杂的物理过程可以从多方面对营养来源、生物栖息地环境、沉积物的形成等海洋环境要素产生多重影响^[3-6]。因此, 了

收稿日期: 2023-06-06; 修订日期: 2023-09-13。

基金项目: 青岛黄海学院 2022 年度博士科研启动基金项目 (2022boshi03)。

作者简介: 高微 (1988—), 女, 河北省唐山市人, 博士, 教授, 研究方向为海洋科学-现代海洋沉积环境与沉积过程。E-mail: gaow@qdihc.edu.cn

* 通信作者: 马本俊, 博士, 副教授, 研究方向为海洋科学技术。E-mail: mabenjun@hrbeu.edu.cn

解这里海洋环流的结构和变异性及其对海洋环境要素的影响对于研究 ENSO 和全球物质循环的意义重大。

北赤道逆流(North Equatorial Countercurrent, NECC)位于赤道以北 $2^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 之间,是一支自西向东稳定流动的洋流。它是热带太平洋赤道流系中的一支重要海流,其北部边界为北赤道流(North Equatorial Current, NEC),南界为南赤道流(South Equatorial Current,

SEC),源头南、北两侧还分别存在着反气旋式的哈马黑拉暖涡(Halmahera Eddy, HE)和气旋式的棉兰老冷涡(Mindanao Eddy, ME),其下方还有近几年发现的西向的北赤道次流(North Equatorial Subsurface Current, NESU)^[2,7],如图1所示。此外,北赤道逆流还是热带西太平洋最大的上涌穹窿棉兰老冷穹(Mindanao Dome, MD)的南边界。

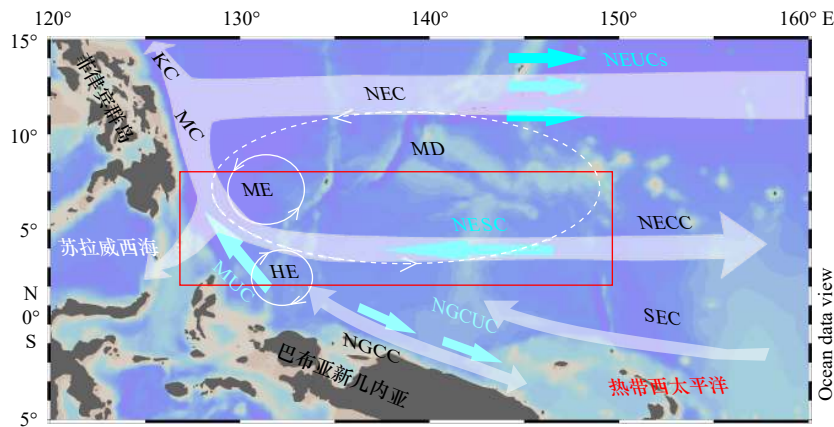


图1 研究区地理位置概况和洋流格局

Fig. 1 Geographical location and ocean current pattern of the study area

NEC. 北赤道流; MC. 棉兰老流; KC. 黑潮; NECC. 北赤道逆流; SEC. 南赤道流; NGCC. 新几内亚沿岸流; MD. 棉兰老冷穹; ME. 棉兰老冷涡; HE. 哈马黑拉暖涡; MUC. 棉兰老潜流; NEUCs. 北赤道潜流; NGCUC. 新几内亚沿岸潜流; 图中红色矩形框所示为北赤道逆流影响区($2^{\circ}\sim 8^{\circ}\text{N}$, $127^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)

NEC. North Equatorial Current; MC. Mindanao Current; KC. Kuroshio Current; NECC. North Equatorial Countercurrent; SEC. South Equatorial Current; NGCC. New Guinea Coastal Current; MD. Mindanao Dome; ME. Mindanao Eddy; HE. Halmahera Eddy; MUC. Mindanao Undercurrent; NEUCs. North Equatorial Undercurrents; NGCUC. New Guinea Coastal Undercurrent; the red rectangle represents the NECC affected area ($2^{\circ}\sim 8^{\circ}\text{N}$, $127^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)

北赤道逆流将热带西太平洋表层暖水向东输运到东太平洋,在厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)的发生、发展中起着重要作用。它的年际变化被认为与 ENSO 密切相关,厄尔尼诺(EI Niño)事件发生时,北赤道逆流的流轴会向南移动且伴随出现输送增强的特征^[8-10]。此外,北赤道逆流可将源区的富营养盐水由近岸向热带西太平洋甚至是中太平洋输送,在一定程度上改变了赤道太平洋表层水体的寡营养盐特征,影响海表生态环境。前人研究曾指出,热带西太平洋海表叶绿素浓度的高值主要出现在北赤道逆流海区,且在北方的冬末和早春达到最大值,在夏季降低^[4,11]。厄尔尼诺事件发生时,热带西太平洋暖池西部(即北赤道逆流源区)海表叶绿素浓度显著增强,并伴随海表温度降低、海平面高度降低、西风增强的特征^[4]。然而,有关 ENSO 影响下北赤道逆流结构变异与其路径上海表叶绿素高值条带之间的影响机制模型还需要进一步提炼。

因此,本文以热带西太平洋北赤道逆流影响海域

($2^{\circ}\sim 8^{\circ}\text{N}$, $127^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)为研究海区,详细刻画了 2006-2022 年秋冬转换期 ENSO 循环不同阶段北赤道逆流影响海区的多种海洋环境参数的变化特征,重点分析 ENSO 影响下,北赤道逆流影响区海表叶绿素浓度的演变机制问题,探索北赤道逆流影响区海表生态环境变化与 ENSO 之间的响应关系。本文研究结果将有助于深入理解在 ENSO 演化过程中北赤道逆流变化对当地生态系统和气候变化的影响。

2 数据与方法

2.1 数据介绍

2.1.1 海洋 Niño 指数

近年来,海洋 Niño 指数(Oceanic Niño Index, ONI)已经成为识别热带太平洋厄尔尼诺事件和拉尼娜事件的重要指数^[12]。它指的是 Niño 3.4 区域(即 $5^{\circ}\text{N}\sim 5^{\circ}\text{S}$, $120^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{W}$)范围内 3 个月海温异常平均值。其中,当 ONI 在 $+0.5^{\circ}\text{C}$ 以上,则被定义为厄尔尼诺事件;当 ONI 在 -0.5°C 以下,则被定义为拉尼娜事件。

本文使用的2006年1月至2023年6月的ONI数据源自美国大气海洋局气候预测中心(<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/oni>)。

2.1.2 环境数据

海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)、海表面盐度(Sea Surface Salinity, SSS)、海表面水平流速(Zonal Velocity, ZV)、海表面高度异常数据(Sea Level Anomaly, SLA)、原位有机碳总量(Primary Organic Carbon Production by All Types of Phytoplankton, IN-TPP)和海表面叶绿素 *a* 浓度(Surface Chl *a*, SChl *a*)均由国际太平洋研究中心(International Pacific Research Center, IPRC)/亚太数据研究中心(Asia-Pacific Data-Research Center, APDRC)服务器提供。其中,海表面温度数据源自欧洲天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的ORA-S4数据库,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$;海表面盐度数据源自美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research)的CMIP5_rcp85(Coupled Model Intercomparison Project 5)数据库,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$;海表面水平流速数据源自美国海洋和大气管理局的全球海洋数据同化系统(GODAS)数据库,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,正值表示东向流,负值表示西向流;海平面高度异常数据源自法国国家空间研究中心的AVISO卫星测高数据,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$;原位有机碳总量数据源自CMIP5_rcp85数据库,由IPRC/APDRC提供,具有 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的空间分辨率,需要在此说明的是,CMIP5的历史运行数据由海气耦合模式自由振荡得到,而rcp85数据则基于高排放情景;海表面叶绿素浓度数据为MODIS Aqua卫星产品,具有 $0.5^{\circ} \times$

0.5° 的空间分辨率。

2.1.3 降水量数据

降水量数据来自美国气候预测中心(Climate Prediction Center, CPC)降水合并分析数据库(Merged Analysis of Precipitation, CMAP),具有 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的空间分辨率和1个月的时间分辨率。

2.2 分析方法

本文将 $2^{\circ} \sim 8^{\circ}N$, $127^{\circ} \sim 150^{\circ}E$ 作为北赤道逆流影响区,在分析过程中将提取每年10月、11月、12月这3个月份此海区内多种海洋环境参数的平均值异常进行对比,其中,海表面高度异常数据可直接分析,其他参数的异常值由月平均值扣除多年季节平均值得到,以便进行长时间序列的具体分析。

3 结果

3.1 2006–2022年ENSO循环

2006–2022年ONI变化显示ENSO事件与季节周期存在密切关系:厄尔尼诺事件通常开始于北方的春季,在夏季和秋季增长,在冬季达到最大强度,在冬末和翌年春季迅速衰减。在某些情况下,它们会在随后的夏季过渡到拉尼娜事件^[3]。ONI数据(图2)显示,2006–2022年共发生了4次较强的厄尔尼诺事件和4次较强的拉尼娜事件,按照时间顺序分别为2006/2007年厄尔尼诺事件、2007/2009年拉尼娜事件、2009/2010年厄尔尼诺事件、2010/2012年拉尼娜事件、2014/2016年厄尔尼诺事件、2017/2018年拉尼娜事件、2018/2019年厄尔尼诺事件和2020/2022年拉尼娜事件,其他年份则为正常年份(图2)。

数据显示,拉尼娜事件持续的时间略长于厄尔尼

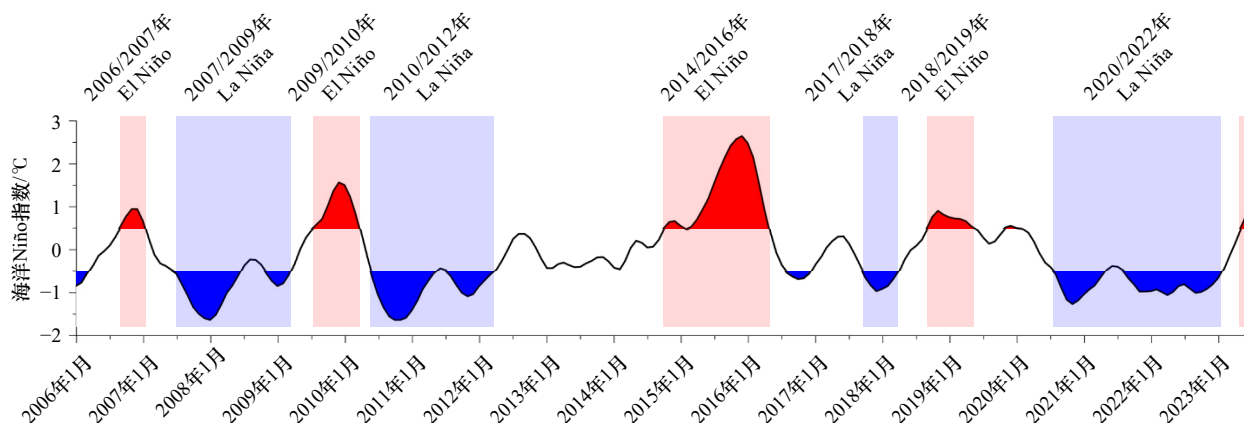


图2 2006–2022年海洋Niño指数(ONI)曲线分布

Fig. 2 The variations of the Oceanic Niño Index (ONI) during 2006–2022

红色阴影和蓝色阴影分别代表不同的ENSO阶段

Red and blue shades represent different ENSO stages, respectively

诺的时间,其中,2007/2009年拉尼娜事件($ONI_{\min} = -1.64^{\circ}\text{C}$)持续了21个月,2010/2012年拉尼娜事件($ONI_{\min} = -1.64^{\circ}\text{C}$)持续了22个月,2017/2018年拉尼娜事件($ONI_{\min} = -0.97^{\circ}\text{C}$)持续了7个月,2020/2022年拉尼娜事件($ONI_{\min} = -1.06^{\circ}\text{C}$)则持续了至少17个月,而2006/2007年厄尔尼诺事件($ONI_{\max} = 0.94^{\circ}\text{C}$)仅持续了5个月,2009/2010年厄尔尼诺事件($ONI_{\max} = 1.56^{\circ}\text{C}$)仅持续了8个月,2015/2016年厄尔尼诺事件强度较大($ONI_{\max} = 2.64^{\circ}\text{C}$),持续了18个月,2018/2019年厄尔尼诺事件($ONI_{\max} = 0.90^{\circ}\text{C}$)仅持续了8个月。此外,这8次 ENSO 事件发生时 ONI 的极大值或极小值基本上都发生在10月、11月、12月这3个月份,本文称这3个月为秋冬转换期,我们针对2006–2022年每年秋冬转换期这3个月份多种海洋参数异常的平均值进行对比分析,探讨 ENSO 循环过程中北赤道逆流影响区海洋环境要素的变化机制。

3.2 2006–2022年秋冬转换期北赤道逆流影响区水文动力环境变化特征

2006–2022年秋冬转换期多种海洋参数异常变化曲线和柱形图(图3)显示,2006–2022年秋冬转换期各种海洋变量异常变化均呈现明显的波动特性。与正常年份相比,厄尔尼诺事件期间,北赤道逆流海域海平面高度、海表温度、海表盐度和降水量均出现了明显的负异常,海表面水平流速、原位有机碳总量和海表叶绿素 *a* 浓度则表现出明显的正异常。特别的是,2006/2007厄尔尼诺事件发生时,原位有机碳总量和海表面叶绿素 *a* 浓度均出现了负异常。而拉尼娜事件发生时,各种海洋参数的异常变化则恰恰相反,研究海区海平面高度、海表温度、海表盐度和降水量表现出明显的正异常,而海表面水平流速、原位有机碳总量和海表叶绿素 *a* 浓度则出现了明显的负异常。

3.3 2006–2022年秋冬转换期北赤道逆流影响区海表面流速和海表叶绿素 *a* 浓度平面变化特征

2006–2022年秋冬转换期海表面流速和海表叶绿素 *a* 浓度平面分布(图4)和异常值平面分布(图5)显示,2006–2022年秋冬转换期北赤道逆流的流速主要出现在 $3^{\circ}\sim 6^{\circ}\text{N}$ 之间,其主流轴所在位置往往伴随出现蜿蜒的海表面叶绿素 *a* 浓度高值条带($\text{SChl } a > 0.1 \mu\text{g/L}$),其源头海域北赤道流流速最大,且海表叶绿素 *a* 浓度值最大。随着北赤道逆流向东流动,北赤道流流速有减小的趋势,海表叶绿素 *a* 浓度逐渐降低,在 150°E 附近北赤道流基本保持稳定流速继续向东流动,而叶绿素 *a* 浓度高值条带基本消失。2006–2022年秋冬转换期研究区流速正异常(东向流

速)和负异常(西向流速)出现位置虽然变化较大,但其流速正异常最大流轴所在位置往往伴随出现蜿蜒的海表面叶绿素 *a* 浓度正异常($\text{SChl } a > 0$),而流速负异常最大流轴所在位置往往伴随出现蜿蜒的海表面叶绿素 *a* 浓度负异常($\text{SChl } a < 0$),海表面叶绿素 *a* 浓度正异常的最大值往往出现在北赤道逆流源头海域。

厄尔尼诺事件发生时,即2006年、2009年、2014年、2015年和2018年的秋冬转换期,北赤道逆流流速明显增大,主流轴流速异常值均表现为较大的正值(东向流),最大值分别为 0.68 m/s 、 0.84 m/s 、 0.43 m/s 、 0.58 m/s 和 0.43 m/s (图5a、图5d、图5i、图5j和图5m),研究区海表叶绿素 *a* 浓度高值条带的范围明显向北赤道逆流主流轴南北两侧变宽并向东延伸的更远(图4a、图4d、图4i、图4j和图4m),海表面叶绿素 *a* 浓度异常值均表现为较大的正值。

拉尼娜事件发生时,即2007年、2008年、2010年、2011年、2017年、2020年、2021年和2022年的秋冬转换期,北赤道逆流流速明显减小,主流轴流速异常值接近于0或表现为较小的负值(西向流)(图5b、图5c、图5e、图5f、图5l、图5o、图5p和图5q),研究区海表面叶绿素 *a* 浓度高值条带的范围明显向北赤道逆流主流轴集中变窄,且向东延伸的距离明显缩短,海表叶绿素 *a* 浓度高值条带的蜿蜒分布特征较为明显(图4b、图4c、图4e、图4f、图4l、图4o、图4p和图4q),海表面叶绿素 *a* 浓度异常值接近于0或表现为较小的正值(图5b、图5c、图5e、图5f、图5l、图5o、图5p和图5q)。

4 讨论

研究区营养物质的分布特征显示出深海营养物质丰富^[4],海表是典型的贫营养水体,而光照和养分是影响浮游植物活动的主要因素^[15–16]。正常情况下,表层 NEC–KC–MC–NECC 洋流系统中处于南部边界的北赤道逆流是影响研究区水平养分通量最大的洋流^[17–18],这导致2006–2022年间在蜿蜒的北赤道逆流路径上存在海表叶绿素 *a* 浓度高值条带。海表流速和海表叶绿素 *a* 浓度平面分布显示,2006–2022年秋冬转换期北赤道逆流路径上往往伴随出现海表叶绿素 *a* 浓度高值条带,且在 150°E 附近逐渐消失(图4),这表明在蜿蜒的北赤道逆流中,叶绿素 *a* 浓度表面高值的有限位置证实了北赤道逆流输送的营养物质恰恰是海表浮游植物的营养来源,且其传播距离不是那么远,或者传播速度非常慢,因此海表叶绿素 *a* 浓度高值条带的位置和范围与北赤道逆流的主流轴和流

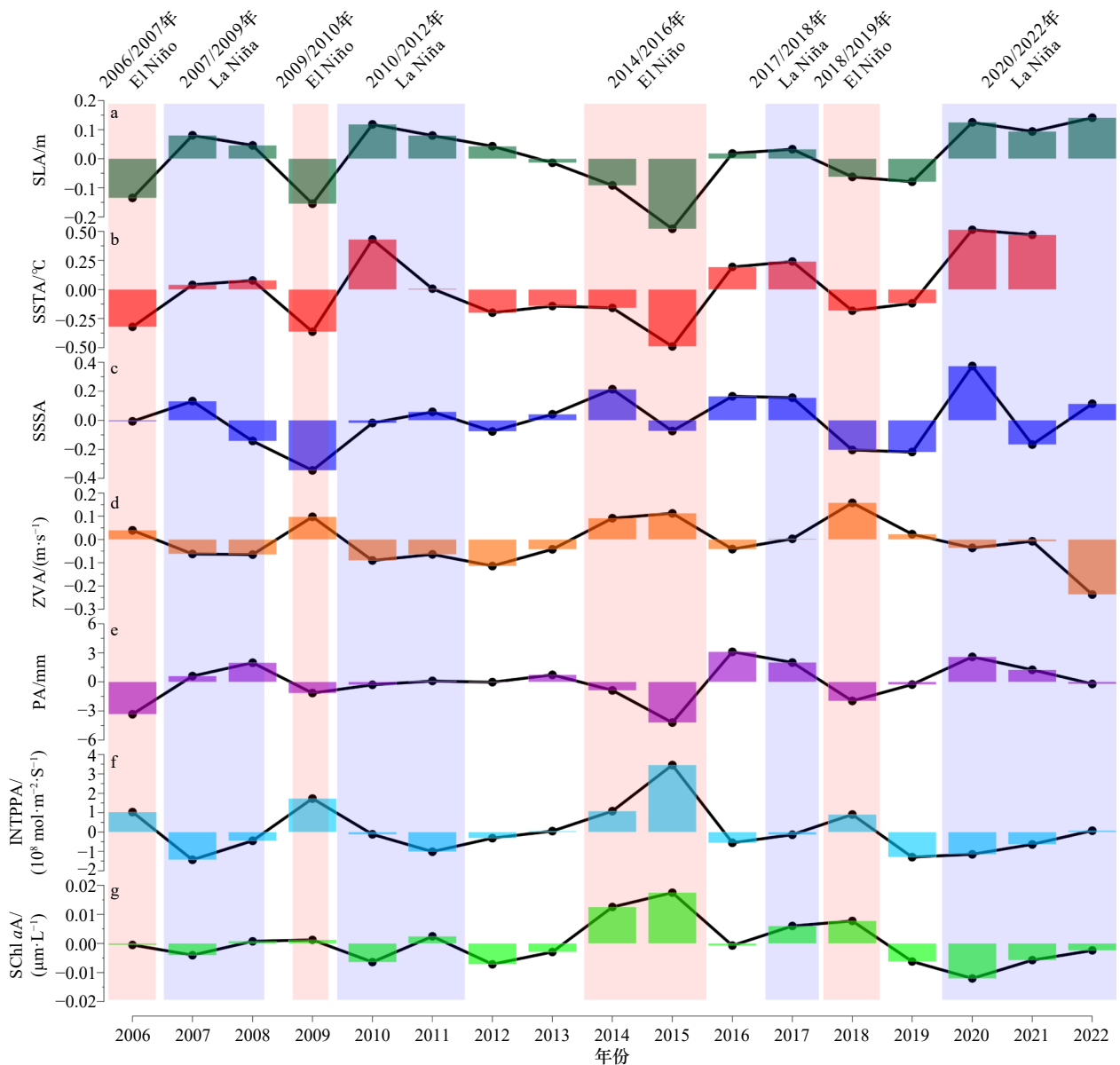


图3 2006–2022年秋冬转换期北赤道逆流影响区海表面高度异常(SLA, a)、海表面温度异常(SSTA, b)、海表盐度异常(SSSA, c)、海表面水平流速异常(ZVA, d)、降水量(PA, e)、原位有机碳总量异常(INTPPA, f)和海表叶绿素 a 浓度异常(SChl aA , g)变化曲线和柱形图

Fig. 3 The variations curve and column chart of the sea level anomaly (SLA, a), sea surface temperature anomaly (SSTA, b), sea surface salinity anomaly (SSSA, c), zonal velocity anomaly (ZVA, d), precipitation anomaly (PA, e), primary organic carbon production by all types of Phytoplankton anomaly (INTPPA, f) and surface Chl a anomaly (SChl aA) during autumn and winter transition period during 2006–2022 in the NECC affected area

红色阴影和蓝色阴影分别对应图2中不同 ENSO 阶段

Red and blue shades represent different ENSO stages in Fig. 2, respectively

速紧密相关。

此外, 数据显示, 北赤道逆流在其源头海域的流速最大, 且该海域海表叶绿素 a 浓度值最大, 说明浮游植物在北赤道逆流源头海域大量繁殖, 这与该位置靠近陆地, 营养盐供给丰富密切相关, 而此位置存在的棉兰老冷穹产生的上升流也会对其营养盐供给产

生较大影响^[19]。此外, Christian 等^[19]通过约化重力模式发现, 新几内亚海岸潜流从南太平洋输送的富含营养的水^[20], 可作为北赤道逆流的主要养分来源。新几内亚海岸潜流流速在北方冬季达到最大值, 在给定的密度下, 可在北赤道逆流产生一个更大浓度的营养浓度梯度^[11, 21]。这些因素都导致了蜿蜒的北赤道逆流中

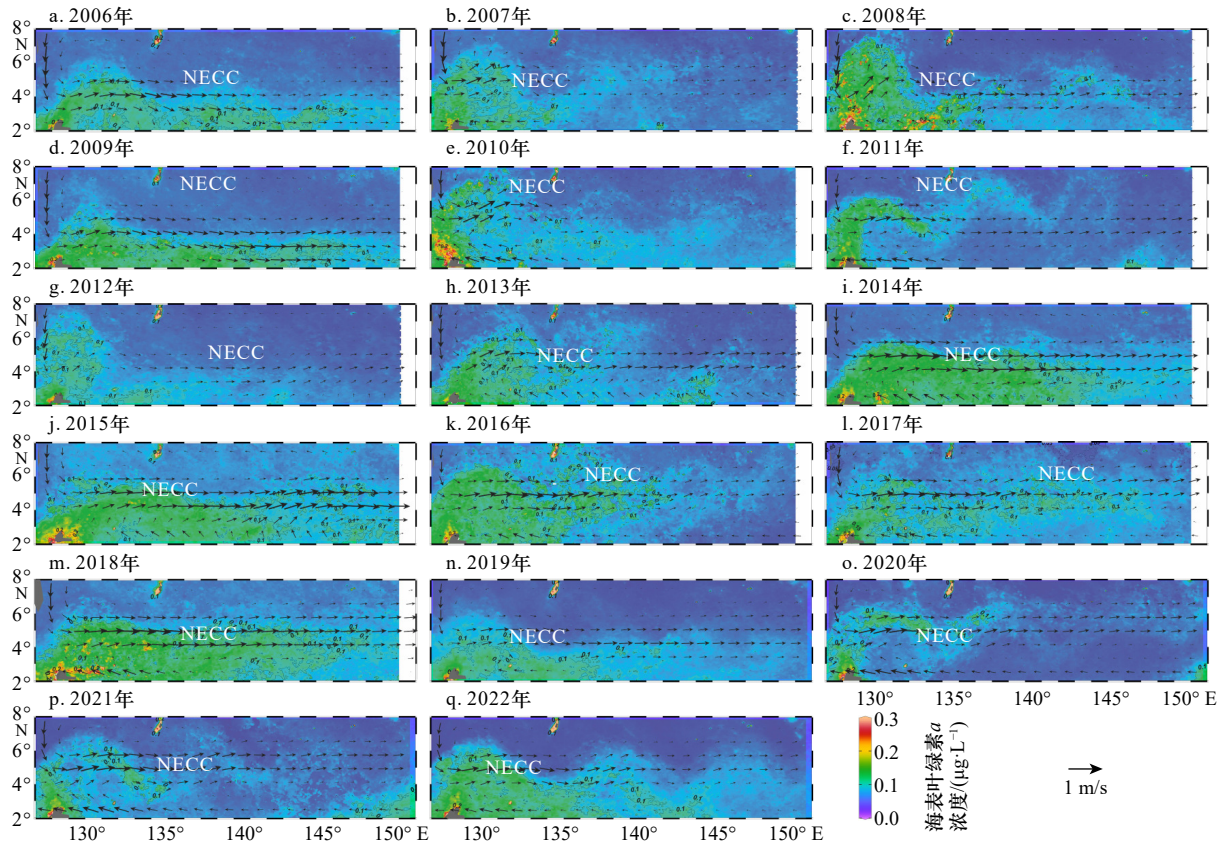


图4 2006–2022年秋冬转换期北赤道逆流影响区海表面流速和海表叶绿素 a 浓度平面分布

Fig. 4 Horizontal distribution of surface velocity and surface Chl a concentration during autumn and winter transition period in 2006–2022 in the NECC affected area

箭头长度代表流速的大小

The arrow length represents the size of surface velocity

存在较高的表面叶绿素 a 浓度值(图5a)。

2006–2022年间ONI和多种海洋参数对比分析结果显示,这些海洋参数的演化过程与ENSO的转变、复苏和暴发有一定的关联。厄尔尼诺事件发生时伴随着产生了赤道西太平洋的一系列西风事件,海表东向流显著增强(图3d),相关的风强迫触发了海洋开尔文波向东下降^[22–23],表层暖水从西太平洋更多的向中东太平洋迁移。这种温水迁移不仅导致热带西太平洋异常低温的发展(图3b)和海表面高度突然下降(图3a),而且还带走了大量的热量和水蒸气,导致研究区降雨减少(图3e)。

以2014/2016年厄尔尼诺事件为例,西太平洋海面NEC–KC–MC–NECC系统仍然存在,而NEC、MC和北赤道逆流的流速明显增大,KC的流速明显减小^[24–25],形成了较正常情况下更强的逆时针海洋环流。海表叶绿素 a 浓度高值条带在曲折的北赤道逆流中仍然存在,并与北赤道逆流的 最大速度重合 ,且其浓度值较正常情况明显增大(图4i和图4j,图5i和图5j)。

这是由于2014/2016年厄尔尼诺事件发生时,多种有利于北赤道逆流影响区海面浮游植物生长的因素共同发生,导致在蜿蜒的北赤道逆流海区存在更高的海面叶绿素 a 浓度异常值(图3g),同时形成了更高的海表原位有机碳总量异常值(图3f)。首先,暴发的西风事件直接导致北赤道逆流增强,使北赤道逆流主流轴更接近海表,蜿蜒的北赤道逆流中曲流诱导的上升流增强,更多的营养盐从北赤道逆流的源区向更东部的海表运输,使得北赤道逆流路径上海表叶绿素高值条带向东延伸(图4i和图4j,图5i和图5j)。其次,厄尔尼诺事件发生时,沿岸新几内亚海岸流和沿岸新几内亚海岸潜流均发生了强化(图4i和图4j,图5i和图5j),这增加了高盐度、富营养盐的南太平洋热带水(SPTW)的转运,为北赤道逆流提供了更多的营养^[26],使得NECC主流轴南侧海表的叶绿素 a 浓度也发生了显著的增大,研究区海表叶绿素 a 浓度高值条带范围显著扩张。此外,2014/2016年厄尔尼诺事件发生时,棉兰老冷穹海区原存在于次表层以下

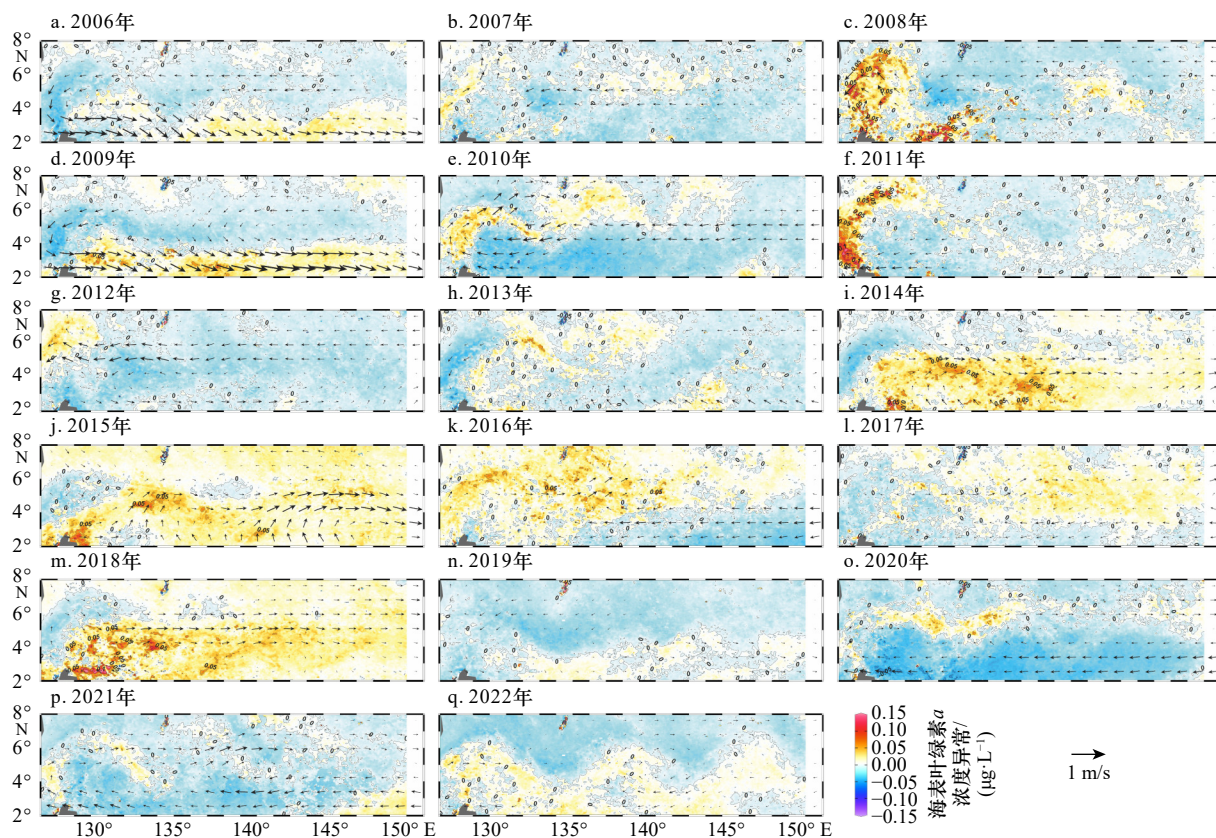


图 5 2006–2022 年秋冬转换期北赤道逆流影响区海表面流速异常和海表叶绿素 *a* 浓度异常平面分布

Fig. 5 Horizontal distribution of surface velocity anomaly and surface Chl *a* concentration anomaly during autumn and winter transition period during 2006–2022 in the NECC affected area

东向流速代表海表面流速正异常, 西向流速代表海表面流速负异常, 箭头长度代表异常值的大小

The east velocity represents the positive surface velocity anomaly, and the west velocity represents the negative surface velocity anomaly, the arrow length represents the size of surface velocity

(100 m) 的上升流显著增强, 温跃层上抬, 甚至可以将深层营养物质抬升到海面, 也会从垂向上增加北赤道逆流影响区海表营养盐含量, 使研究区海表叶绿素 *a* 浓度升高^[24–25]。

拉尼娜事件发生时, 北半球赤道东北信风增加, 海表东向流相对减弱(图 3d), 赤道西部太平洋的海表变暖(图 3b), 这种温水的积累不仅导致研究区海平面高度显著增大(图 3a), 还吸收了大量的热量和水蒸气, 导致降水相对增加(图 3e)。与正常年份和厄尔尼诺年相比, 以 2020/2022 年拉尼娜事件为例, 表层 NEC-KC-MC-NECC 系统仍然存在于西太平洋, 但拉尼娜年各分支的流速似乎略有减小, 形成了一个较弱的逆时针环流^[24–25]。海表叶绿素 *a* 浓度高值条带仅存在于蜿蜒的北赤道逆流中, 其浓度值与厄尔尼诺年相比显著下降(图 5o、图 5p 和图 5q)。这是由于 2020/2022 年拉尼娜事件发生时, 发生了与厄尔尼诺阶段几乎相反的海洋过程, 较弱的北赤道逆流、由减弱的

新几内亚沿岸流和新几内亚海岸潜流向北赤道逆流输送的富营养水减少、减弱的棉兰老冷穹上升流, 这都导致海面浮游植物活动减弱, 蜿蜒的北赤道逆流路径上海表叶绿素 *a* 浓度高值条带的浓度降低。

基于以上分析, 本文图 6b 和图 6c 展示了 2006–2022 年北赤道逆流影响区海洋生态环境要素对厄尔尼诺事件和拉尼娜事件的响应机制, 指出 ENSO 循环可以对北赤道逆流影响区海表生物生产力产生重要影响, 进而对海表叶绿素 *a* 浓度的分布起到一定的调控作用。

5 结论

本文首先通过对 2006–2022 年不同海洋资料的分析, 揭示了北赤道逆流影响区海洋环境要素的变化特征, 讨论了它们对 ENSO 的响应, 探讨了 ENSO 循环对北赤道逆流影响区海洋条件和海表生产力条件的调节机制。结果表明: 正常年份, 东向北赤道逆流

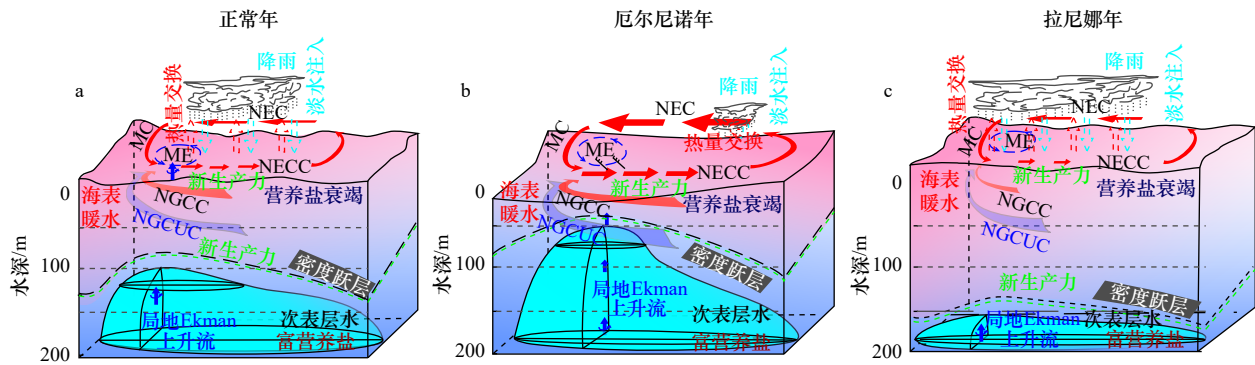


图6 2006–2022年 ENSO 循环不同阶段研究区海洋特征变化机制示意图

Fig. 6 Schematic diagram of oceanic variations in different phases of ENSO cycle from 2006 to 2022

从其源区携带的营养物质和新几内亚沿岸流、新几内亚海岸潜流携带的营养物质共同导致北赤道逆流影响区海表叶绿素 *a* 浓度高值条带的形成;厄尔尼诺事件发生时,热带西太平洋西风事件增多,东向北赤道逆流增强,大量表层水东移,研究区海平面降低,深水向浅层补给增加,深层冷水上抬,海表温度降低,降水量降低。此外,北赤道逆流、新几内亚沿岸流、新几内亚海岸潜流和棉兰老冷穹上升流的增强,将更多的养分从水平和垂直层面输送到海面,导致海表面叶

绿素 *a* 浓度和原位有机碳总量显著增加。拉尼娜事件发生时,北赤道逆流影响区海洋环境要素变化与厄尔尼诺事件发生时几乎相反,但其变化程度弱于厄尔尼诺时期,海表面叶绿素 *a* 浓度和原位有机碳总量降低。

本文强调了2006–2022年 ENSO 循环在北赤道逆流影响区水文–气候演化和生态效应中的重要作用,这对于理解海洋生态、气候、环境系统乃至物质循环对局地/全球气候变化的响应至关重要。

参考文献:

- [1] Hu Dunxin, Wu Lixin, Cai Wenju, et al. Pacific western boundary currents and their roles in climate[J]. *Nature*, 2015, 522(7556): 299–308.
- [2] Wang Fan, Wang Jianing, Guan Cong, et al. Mooring observations of equatorial currents in the upper 1 000 m of the western Pacific Ocean during 2014[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(6): 3730–3740.
- [3] Radenac M H, Léger F, Singh A, et al. Sea surface chlorophyll signature in the tropical Pacific during eastern and central Pacific ENSO events[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C4): C04007.
- [4] Hou Xueyan, Dong Qing, Xue Cunjin, et al. Seasonal and interannual variability of chlorophyll-*a* and associated physical synchronous variability in the western tropical Pacific[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 158: 59–71.
- [5] Lim H G, Dunne J P, Stock C A, et al. Attribution and predictability of climate-driven variability in global ocean color[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(10): e2022JC019121.
- [6] Lim H G, Dunne J P, Stock C A, et al. Oceanic and atmospheric drivers of Post-El-Niño chlorophyll rebound in the equatorial Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(5): e2021GL096113.
- [7] Yuan Dongliang, Zhang Zhichun, Chu P C, et al. Geostrophic circulation in the tropical North Pacific Ocean based on Argo profiles[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44(2): 558–575.
- [8] Zhao Jun, Li Yuanlong, Wang Fan. Dynamical responses of the West Pacific North Equatorial Countercurrent (NECC) system to El Niño events[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(6): 2828–2844.
- [9] Tan Shuwen, Zhou Hui. The observed impacts of the two types of El Niño on the North Equatorial Countercurrent in the Pacific Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(19): 10493–10500.
- [10] 陈永利, 官聪, 赵永平, 等. ENSO 相联系的热带太平洋上层海洋异常环流 [J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(5): 967–977.
Chen Yongli, Guan Cong, Zhao Yongping, et al. ENSO-related upper-layer ocean circulation anomaly in the tropical Pacific Ocean[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(5): 967–977.
- [11] Messié M, Radenac M H. Seasonal variability of the surface chlorophyll in the western tropical Pacific from SeaWiFS data[J]. *Deep-Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*, 2006, 53(10): 1581–1600.
- [12] Nava H, López N, Ramírez-García P, et al. Contrasting effects of the El Niño 2015–16 event on coral reefs from the central Pacific coast of Mexico[J]. *Marine Ecology*, 2021, 42(2): e12630.
- [13] Timmermann A, An S I, Kug J S, et al. El Niño–Southern Oscillation complexity[J]. *Nature*, 2018, 559(7715): 535–545.

- [14] Codispoti L A, Flagg C N, Swift J H. Hydrographic conditions during the 2004 SBI process experiments[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2009, 56(17): 1144–1163.
- [15] Cullen J J. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll-*a*[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1982, 39(5): 791–803.
- [16] Eppley R W, Swift E, Redalje D G, et al. Subsurface chlorophyll maximum in August-September 1985 in the CLIMAX area of the North Pacific[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1988, 42: 289–301.
- [17] Kashino Y, Ishida A, Hosoda S. Observed ocean variability in the Mindanao Dome Region[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(2): 287–302.
- [18] Zhao Jun, Li Yuanlong, Wang Fan. Seasonal variation of the surface North Equatorial Countercurrent (NECC) in the western Pacific Ocean[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2016, 34(6): 1332–1346.
- [19] Christian J R, Murtugudde R, Ballabrera-Poy J, et al. A ribbon of dark water: phytoplankton blooms in the meanders of the Pacific North Equatorial Countercurrent[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, 51(1/3): 209–228.
- [20] Kuroda Y. Variability of currents off the northern coast of New Guinea[J]. *Journal of Oceanography*, 2000, 56(1): 103–116.
- [21] Kaneko I, Takatsuki Y, Kamiya H, et al. Water property and current distributions along the WHP-P9 section (137°–142°) in the western North Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C6): 12959–12984.
- [22] Cane M A. The evolution of El Niño, past and future[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2005, 230(3–4): 0–240.
- [23] Chen Dake, Lian Tao, Fu Congbin, et al. Strong influence of westerly wind bursts on El Niño diversity[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(5): 339–345.
- [24] Gao Wei, Wang Zhenyan, Huang Haijun. Variations of the Eco-Hydro-Climatic environment response to the 2015/2016 super El Niño event in the Mindanao dome upwelling system[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2022, 21(1): 69–80.
- [25] Gao Wei, Wang Zhenyan, Zhang Ronghua, et al. Variability of the Mindanao Dome upwelling system during ENSO event from 2010 to 2015[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2022, 189: 103875.
- [26] Gorgues T, Menkes C, Slemmons L, et al. Revisiting the La Niña 1998 phytoplankton blooms in the equatorial Pacific[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2010, 57(4): 567–576.

Response mechanism of the surface chlorophyll concentration to ENSO cycle influenced by North Equatorial Countercurrent during autumn and winter transition period in the tropical western Pacific

Gao Wei¹, Ma Benjun²

(1. *Qingdao Huanhai University, Qingdao 266427, China*; 2. *Qingdao Innovation and Development Base, Harbin Engineering University, Qingdao 266427, China*)

Abstract: There are also obvious inter-annual variations of the North Equatorial Countercurrent (NECC) during the occurrence and development of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO), but its changing process in hydroecological conditions and response mechanism influenced by ENSO cycle are still unclear. Taking the NECC affected area in the tropical western Pacific as the study area, this paper analyzes the characteristics of the changes of hydroecoclimatic conditions at different stages during the ENSO cycle during autumn and winter transition period from 2006 to 2022. Results reveal that there are high chlorophyll concentration bands in the NECC source area and its path, which are formed by the combined influence of nutrients carried by the NECC from its source area and the New Guinea Coastal Undercurrent. The upwelling of the Mindanao Dome also has a great influence on the nutrient supply. When El Niño events occurred, the westerly wind events in the tropical western Pacific increased, the NECC strengthened, a large amount of surface water moved eastward, the sea level in the study area decreased, the deep water recharge to the shallow layer increased, and the deep cold water rose. The jointly enhanced NECC, New Guinea Coastal Current, New Guinea Coastal Undercurrent and Mindanao Dome upwelling transport more nutrients to the sea surface from both horizontal and vertical levels, resulting in significant increases in surface chlorophyll concentration and primary organic carbon production by all types of phytoplankton. When La Niña events oc-

curred, the changes of ecohydroclimatic conditions in the NECC affected area are almost opposite to those during El Niño events, but the degree of change is weaker than that during El Niño events. The combined weakening of the NECC, the New Guinea Coastal Undercurrent and the Mindanao Dome upwelling significantly reduce the nutrients delivered to the sea surface from the horizontal and vertical levels. The chlorophyll concentration and primary organic carbon production by all types of phytoplankton decreased significantly. This paper proposes a model of the response mechanism of the evolution of hydroecoclimatic conditions in the NECC affected area to El Niño and La Niña events, which is conducive to further analysis of the role of ENSO cycle in local ecological effects and hydroclimatic evolution. It has important significance for understanding the impact of global climate change on the material cycle.

Key words: NECC; El Niño-Southern Oscillation (ENSO); marine environmental factors; tropical western Pacific