

DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2026.01.001

南海北部温跃层特征分析

郭雨榕, 王宁*, 胡王江, 闫恒乾, 张永垂

(国防科技大学气象海洋学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 采用 GLORYS12V1 等再分析资料, 分析了南海北部海域温跃层的季节特征及其与厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)事件的关联。结果表明: 受不同季节太阳辐射差异影响, 平均温跃层上界深度冬季最深、夏季最浅, 温跃层强度和厚度的季节变化特征与上界深度相反; 受季风和尺度涡影响, 温跃层上界深度在冬季和夏季呈显著的西北—东南向“跷跷板”分布, 冬季表现为西北深、东南浅, 夏季则相反; 温跃层上界深度与 Niño3.4 指数存在较强负相关, ENSO 不同位相通过不同机制影响南海北部温跃层上界深度, 厄尔尼诺发生时, 风应力和环流异常是导致南海北部温跃层上界深度异常的主要原因, 拉尼娜事件中, 温跃层上界深度的异常加深则主要由短波辐射通量异常引起。

关键词: 南海北部; 温跃层; 厄尔尼诺-南方涛动

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)01-0001-12

0 引言

海洋中的温跃层是指海水温度垂直梯度较大的水层, 其对声波传播、潜艇活动及海洋渔业等活动都有着极为重要的影响, 因此温跃层研究长期以来受到高度关注。

南海位于我国大陆南侧, 海域辽阔、资源丰富, 尤其在北部海域油田密布、渔业资源丰富。更为重要的是, 该海域拥有陡峭的大陆坡、复杂的海底地形, 同时受季风和黑潮共同影响, 海区水文环境复杂多变且中尺度现象频发, 导致跃层分布更具特殊性。该区域温跃层直接关系我国国防安全, 研究意义重大。

对南海北部海域温跃层的研究由来已久。毛汉礼等^[1]基于 1958—1959 年全国海洋普查资料, 研究了中国近海温跃层的分布及变化特征, 将南海北部陆架区温跃层的发展大致分为 4 个阶段: 无跃期、成长期、强盛期、消衰期, 分别对应 11 月—次年 2 月、3—5 月、6—8 月、9—10 月。Liu 等^[2]基于 Levitus

海温数据分析了南海深海区季节性温跃层的动态特征, 证实季风、局地涡旋和黑潮对温跃层具有显著影响。陈希等^[3]基于 21 层海温再分析资料, 分析了南海北部海区温跃层逐月强度、深度及厚度特征, 表明净辐射通量异常是导致该海域季节性温跃层分布特征变化的重要因素。兰健等^[4]基于通用数字环境模型 (Generalized Digital Environmental Model, GDEM) 的温、盐资料, 分析了南海表层环流多涡结构的分布特征和季节变化规律, 指出南海温跃层受环流和多涡结构影响显著。胡希声^[5]利用数值模拟技术分析了南海北部温跃层的季节性特征, 通过数值试验证实风场是温跃层形成和强弱变化的主要影响因子。蒋国荣等^[6]基于 Levitus 逐月再分析海温资料, 分析了南海北部几条主要经、纬线剖面的温跃层特征变化, 结果表明该海域跃层深度逐月变化显著, 而厚度和强度的逐月变化则相反。田永青等^[7]利用调查数据及遥感数据, 揭示了 2013 年南沙群岛海域温跃层的季节变化特征, 分析得出风应力旋度产生的 Ekman 抽吸可使温跃层上

收稿日期: 2024-11-20。

基金项目: 国家自然科学基金(42205069、42206205)。

作者简介: 郭雨榕(2002-), 男, 硕士, 主要从事海洋资料同化研究。E-mail: guoyurong@nudt.edu.cn

*通信作者: 王宁(1988-), 男, 副教授, 博士, 主要从事海洋中小尺度过程研究。E-mail: wangning19@nudt.edu.cn

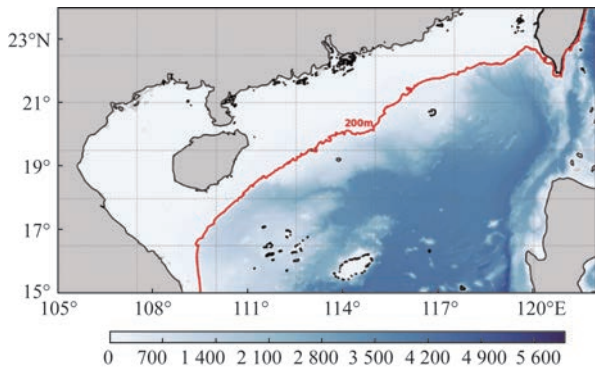


图1 南海北部水深地形图(单位:m)

Fig.1 Bathymetric topographic map of the northern South China Sea (unit: m)

界抬升。Fan 等^[8]基于区域海洋模式 (Regional Ocean Modeling System, ROMS) 对南海温跃层的季节变化开展数值研究, 根据垂直温度廓线的形状划分出 5 种温跃层类型, 同时讨论了温跃层对台风过程的响应。Peng 等^[9]基于 SODA (Simple Ocean Data Assimilation) 数据, 探究了跃层上界深度月变化的形成机制, 指出表面浮力通量和风应力旋度在其上界深度月变化中起主导作用。

近年来, 南海北部温跃层与厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 等大尺度气候异常的关联同样受到关注。彭汉帮^[10]基于多年 SODA 月平均海温等数据, 探讨了 ENSO 背景下南海温跃层上界深度的年际变化, 发现南海温跃层上界深度对 ENSO 暖事件和冷事件的响应特征截然不同, 且这一差异是由浮力通量和风应力旋度在冷暖事件中的差异造成的。方雪娇^[11]基于 SODA 同化数据和美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 数据, 研究了南海温跃层上界深度的年际变化特征及其与厄尔尼诺 (El Niño) 事件的关系。Peng 等^[12]选取了 1960—2010 年 9 起 El Niño 事件和 12 起拉尼娜 (La Niña) 事件, 指出在两类事件的成熟阶段, 南海平均跃层深度分别表现为负异常和正异常特征, 浮力通量和风应力旋度对温跃层变化具有显著影响。翁博超等^[13]基于再分析资料, 指出西北太平洋异常反气旋的差异是南海温跃层深度在不同厄尔尼诺事件中存在相应差异的关键。

关于南海北部海域温跃层特征分布规律和物

理机制的研究, 前人已取得一定成果, 但仍存在一些不足, 如专门针对该海域的研究较少、所用数据分辨率偏低、ENSO 事件对不同季节温跃层的影响分析相对缺乏等。本文将利用 1993—2019 年高分辨率全球物理海洋再分析数据 GLORYS12V1, 系统研究南海北部温跃层的分布特征及其与 ENSO 事件的关联机制。

1 数据及方法

1.1 数据

本文使用欧洲哥白尼海洋服务 (网址: <https://data.marine.copernicus.eu/>) 提供的全球物理海洋再分析数据、美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 气候预测中心提供的月度 Niño3.4 数据 (网址: <http://www.cpc.noaa.gov/data/indices/ersst4.Niño.mth.81-10.ascii>), 以及欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 提供的 ERA5 月平均 10 m 风场数据和短波辐射通量数据 (网址: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=download>)。

GLORYS 是由法国墨卡托海洋中心 (Mercator Océan) 在 MyOcean 框架下实施的全球海洋资料同化再分析系统。该系统基于 NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) 海洋数值模型, 采用降阶卡尔曼滤波器联合同化沿轨高度计 (海平面异常)、卫星海表面温度、海冰密集度及现场温度和盐度垂直剖面数据; 此外, 3D-VAR 方案可为温度和盐度中缓慢演变的大尺度偏差提供校正。本文采用 1993—2019 年南海北部海域 (15°~22°N, 105°~120°E, 见图 1) 的月平均温度数据, 其水平分辨率为 1/12°×1/12°, 垂直方向覆盖 0.5~5 728 m, 共设 50 层, 间隔由浅到深从 1 m 增加至 450 m, 其中 100 m 和 300 m 深度处的间隔约为 15 m 和 45 m。

1.2 温跃层计算方法

温跃层的确定方法主要有 S-T 法、最大曲率法、垂直梯度法 3 类。在以往南海温跃层的研究中, 绝大多数采用垂直梯度法, 国家技术监督局《海洋调查规

范》^[14]也采用该方法,并规定跃层判定标准如下:

当水深大于 200 m 时,温度垂直梯度 $\Delta T/\Delta Z=0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$;

当水深小于 200 m 时,温度垂直梯度 $\Delta T/\Delta Z=0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

垂向梯度法及上述判定标准已得到广泛应用,本文也将采用《海洋调查规范》的标准判断温跃层。计算中发现,南海北部深水区有时会同时存在季节性温跃层和永久性温跃层,导致跃层结构不连续,进而影响跃层上界深度和厚度的准确判断。因此,本研究在深水区滤除季节性温跃层,而在浅水区关注季节性跃层。具体方法为:在梯度计算中识别到温度剖面上的跃层不连续现象后,将断点以上的跃层视为季节性跃层;滤除深水区季节性温跃层后,取垂向上梯度最先满足判定标准的水层上界作为温跃层上界,最后一个满足标准的水层下界作为温

跃层下界,据此求得温跃层的上界深度和厚度,以垂向上的梯度最大值作为跃层强度。

2 南海北部海域温跃层季节特征

图2—4分别给出了南海北部温跃层上界深度、厚度和强度的月平均分布,从图中可以看出南海北部温跃层特征随季节显著变化。冬季(12月—次年2月),温跃层各个特征(上界深度、厚度和强度)的分布均较为一致。冬季太阳辐射较弱,且东北季风强劲,海面风的搅拌作用使得海水垂直混合较强,导致陆架区不存在温跃层;同时,南海北部温跃层上界深度在冬季达到全年最深,上界深度大多超过 50 m。温跃层上界深度等值线基本沿东北—西南方向延伸,西北海域较深(可达 90 m)、东南海域较浅,吕宋岛西北侧存在温跃层上界深度低值中心,

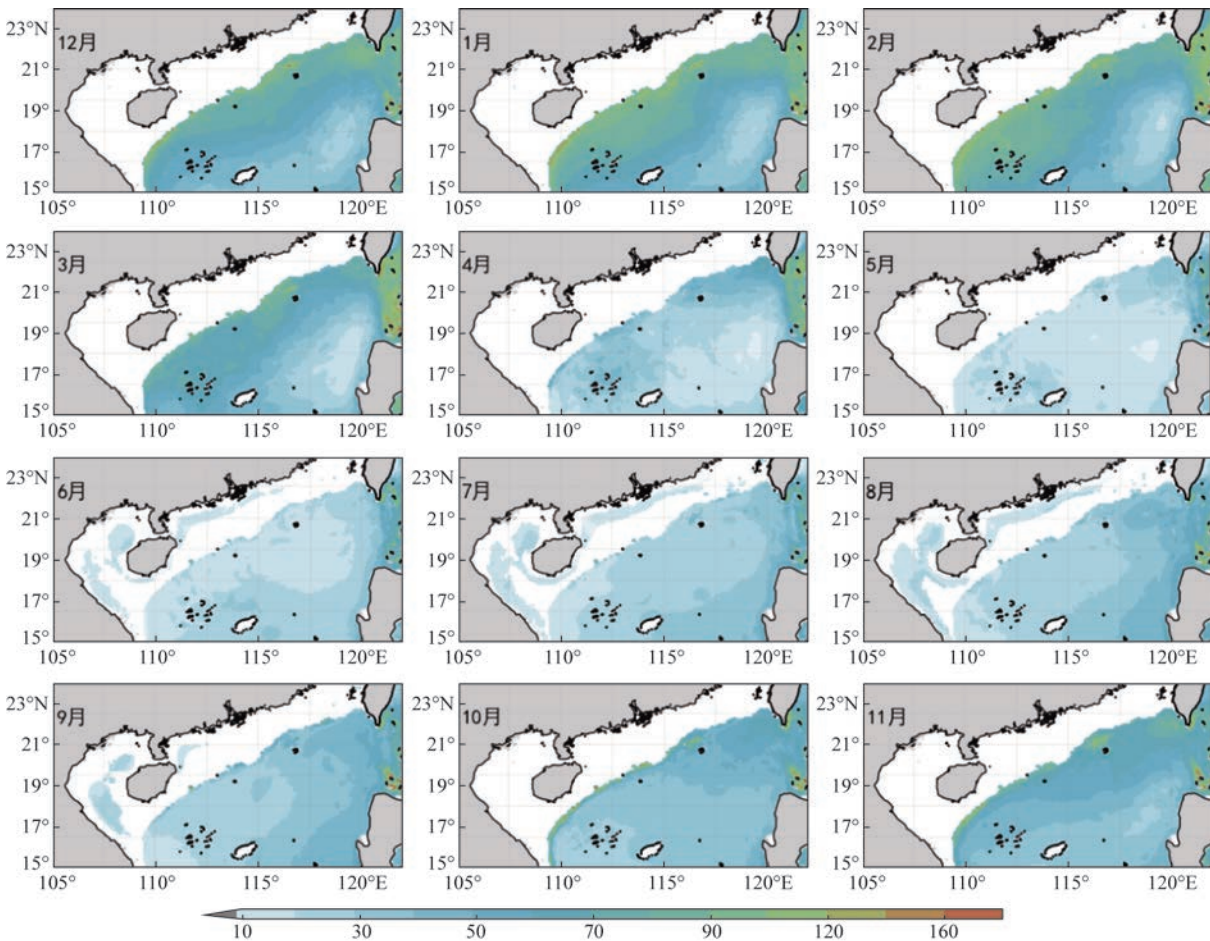


图2 南海北部温跃层上界深度气候态月平均分布(单位:m)

Fig.2 Climatological monthly mean thermocline upper boundary depth of the northern South China Sea (unit: m)

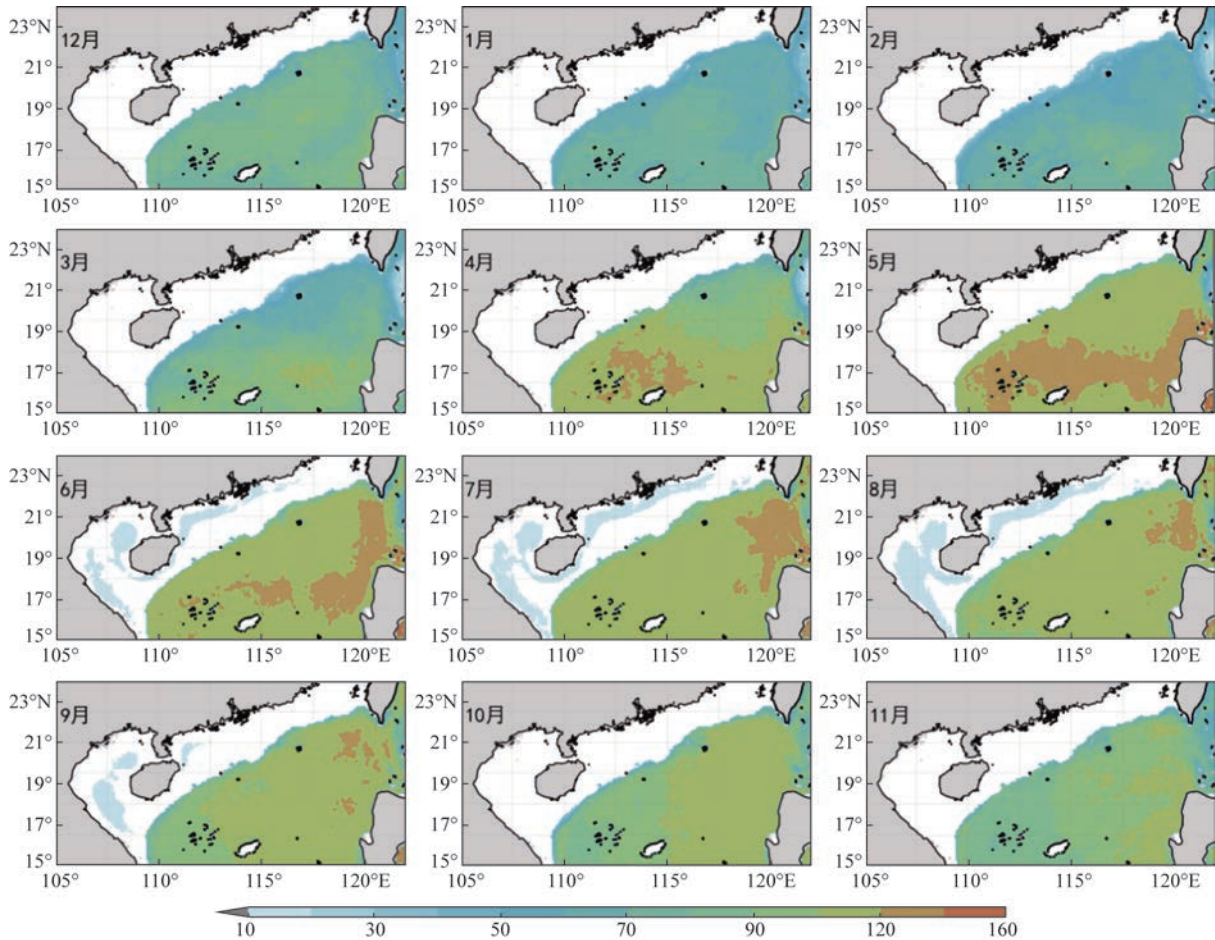


图3 南海北部温跃层厚度气候态月平均分布(单位:m)

Fig.3 Climatological monthly mean thermocline thickness of the northern South China Sea (unit: m)

上界深度只有 20 m。这主要是由于冬季强烈的东北季风引发西北向 Ekman 水平输运,西北海域受大陆架阻挡,表层海水在陆架处堆积,导致温跃层上界深度增加;而东南海域处于 Ekman 输运驱动的上升流区,叠加吕宋冷涡的影响,中心海流辐合上升促使温跃层抬升,进而导致该处温跃层上界深度较浅。吕宋海峡温跃层上界深度同样较深,推测可能与黑潮主轴附近海水流速不稳定、垂直混合较强有关。冬季南海北部温跃层厚度分布较为均匀,平均约 70 m;吕宋海峡温跃层厚度较小,仅 50 m 左右,这可能与该海域温跃层上界深度较深,且下界深度和上界深度呈反位相变化的现象有关^[15]。跃层强度由浅海到深海逐渐变弱,从 0.15 °C/m 递减至 0.05 °C/m,其原因在于浅海表层暖水堆积,且受季风搅拌作用较强,导致浅海温度梯度进一步减小。

春季(3—5月),随着东北季风向西南季风转

换,南海北部海域风力减小,海面风搅拌作用和 Ekman 水平输运都减弱;同时太阳辐射逐渐变强,上层海水开始出现层化,海水垂直混合整体变弱,混合层变浅,温跃层上界深度减小。具体来看,3月温跃层上界深度分布和冬季类似,但西北海域温跃层上界深度变浅;4月西北海域温跃层上界深度进一步变浅;5月,整个南海北部温跃层上界深度趋于一致,分布较为均匀,平均上界深度约为 20 m。吕宋海峡受黑潮主轴影响,温跃层上界深度变化不大。春季温跃层上界深度变浅,而下界深度受季节变化影响较小,使得该海域春季温跃层增加,平均厚度约 100 m,西沙群岛附近部分海域跃层厚度可达 120 m。温跃层强度分布在 3月与冬季类似,4—5月同样趋于均匀,平均为 0.10 °C/m;吕宋岛西北侧跃层强度较强,达到 0.15 °C/m;吕宋海峡受黑潮影响,水温较高,跃层强度较弱,仅为 0.05 °C/m。

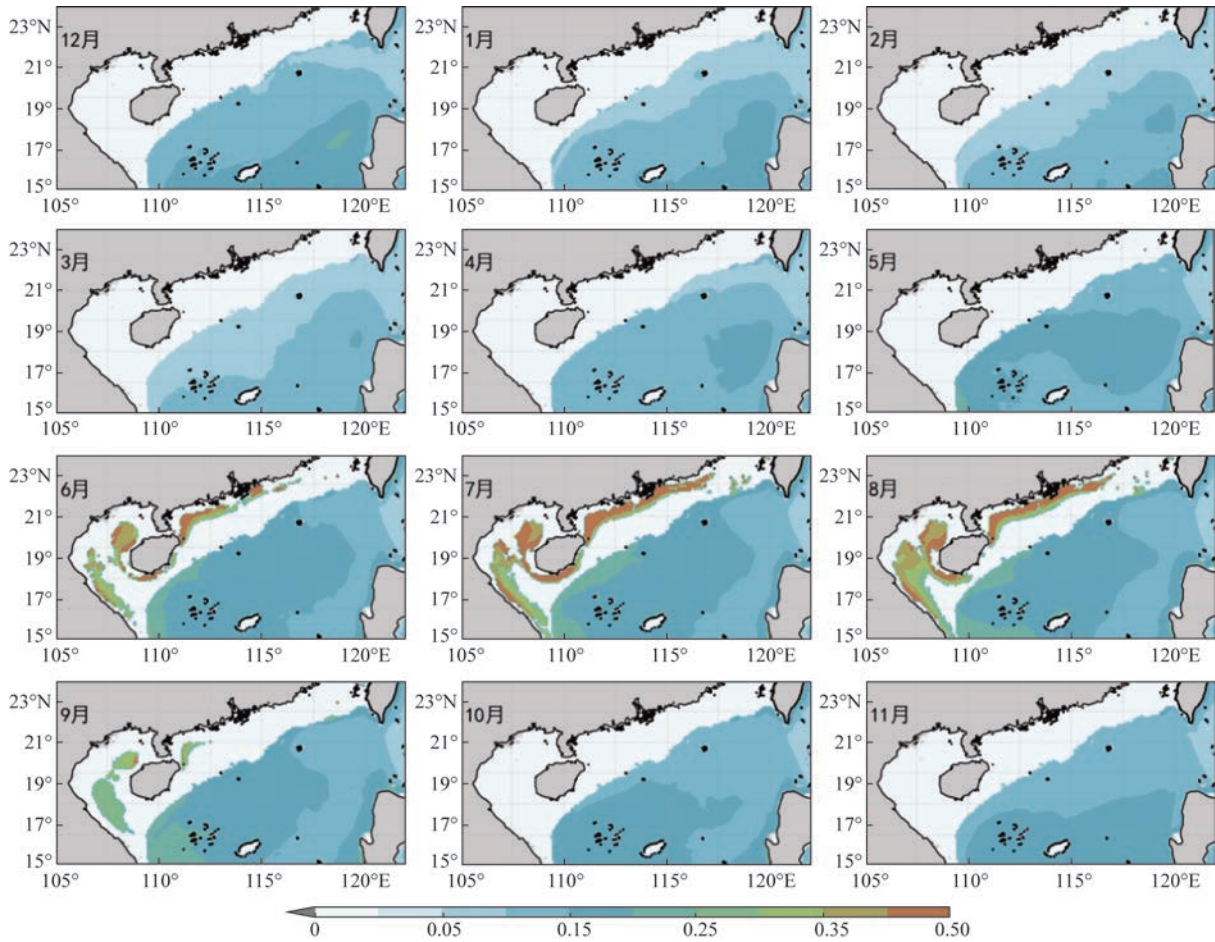


图4 南海北部温跃层强度气候态月平均分布(单位: $^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

Fig.4 Climatological monthly mean thermocline intensity of the northern South China Sea (unit: $^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

夏季(6—8月),太阳辐射达到全年最强,陆架地区海水层化稳定,形成较强的季节性温跃层,跃层上界深度较浅,约为15 m,在北部湾、广东沿海和越南沿海都有分布,强度普遍在 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以上,广东沿海及北部湾可达 $0.48\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,厚度约20 m。陆架向深海过渡区存在一无跃层区域,这一特征和前期研究结果一致^[11,13],可能和本文采用的跃层判断标准有关。温跃层上界深度整体较春季偏深,西北海域较浅(上界深度仅约10 m),且向东南方向逐渐加深,至吕宋岛沿岸可达40 m,其分布形势和冬季相反,但西北和东南海域的上界深度差异弱于冬季。这主要是由于夏季南海北部盛行西南季风,引发东南向Ekman水平输运,受吕宋岛阻挡,表层海水在吕宋岛附近堆积,导致温跃层上界深度增加;而西北部海域受大陆架阻挡,Ekman输运损失的海水主要通过垂向补充,促使温跃层抬升。此外,西南季

风强度较东北季风偏弱,导致夏季Ekman水平输运较弱,进而使西北和东南海域温跃层上界深度差异减小。夏季跃层厚度分布较均匀,平均约100 m;南海暖流分支^[16]在吕宋岛和台湾岛之间汇入黑潮,导致该海域跃层厚度增加至120 m。温跃层强度平均为 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,整体呈西高东低分布,由中南半岛向吕宋岛递减;中南半岛沿岸跃层强度较强,可能受越南冷涡影响,底层冷水上涌与表层暖水形成较大温度梯度,强度达到 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

秋季(9—11月),太阳辐射减弱,陆架区季节性跃层逐渐消退,至10月已完全消失;表层海水温度下降,层化作用减弱,垂直混合加强,温跃层平均上界深度增加至40 m。同时,伴随着西南季风向东北季风转换,表层Ekman水平输送方向开始由东南向转为西北向,南海北部西北海域温跃层上界深度逐渐加深,东南吕宋岛附近海域则逐渐变浅;随着季

风转换完成,11月温跃层分布形态基本和冬季一致。吕宋海峡温跃层上界深度主要受黑潮入侵形成的高温水舌影响^[17],使得该海域表层水温较高、混合层较厚、温跃层上界深度较深。温跃层厚度在南海北部海域呈东高西低态势,平均厚度约80 m,较夏季有所减小,主要是由于太阳辐射减弱导致混合层厚度增加,跃层厚度减小。温跃层强度也随太阳辐射减弱而降低,平均为0.1 °C/m,呈西南高、东北低的分布形态。

综上所述,南海北部海域深海区温跃层常年存在,陆架区季节性温跃层只在6—9月存在。总体而言,受海表温度季节变化影响,温跃层上界深度冬季最深、夏季最浅;温跃层强度和厚度呈相反的变化特征——强度夏季最强、冬季较弱,厚度春夏季较厚、秋冬季较薄。此外,南海北部温跃层上界深度分布受季风影响较大,冬季和夏季在西北—东南方向呈现“跷跷板”分布:冬季受东北季风和吕宋冷涡影响,东南吕宋岛附近海域温跃层较浅,西北陆架区附近海域较深;夏季受西南季风驱动的东南向Ekman输运影响,温跃层上界深度表现为西北浅、东南深的特征。

3 温跃层与 ENSO 的相关性和响应机制分析

前人研究表明,南海温跃层与 ENSO 事件存在

显著相关性^[10,13]。为更细致地分析南海北部海域温跃层对 ENSO 事件的响应特征,本文根据国家气候中心关于厄尔尼诺(拉尼娜)事件(状态)的监测指标^[18],选取 1993—2019 年 7 次中等强度及以上的 ENSO 事件(共 4 次厄尔尼诺事件、3 次拉尼娜事件,见表 1),计算了 7 次 ENSO 事件期间逐月区域平均温跃层特征异常值与 Niño3.4 指数的相关系数。结果显示,Niño3.4 指数与温跃层上界深度、厚度、强度异常值的相关系数分别为-0.66、-0.08、0.23(见表 2),表明从区域平均来看,该海域只有温跃层上界深度与 ENSO 事件存在一定相关性。此外,彭汉帮^[10]的研究表明,南海温跃层对 ENSO 的响应存在一定滞后性,其平均上界深度与 Niño3.4 指数的相关性在滞后 2 个月时达到最强。因此,本文进一步计算了 ENSO 影响下温跃层滞后 Niño3.4 指数 1~5 个月的相关系数。表 2 的结果表明,南海北部平均温跃层厚度和强度与 Niño3.4 指数的相关系数虽然随滞后时间增加基本呈逐渐增大趋势,但一直处于较低水平;平均温跃层上界深度与 Niño3.4 指数的最强相关性出现在滞后 1 个月时,相关系数可达-0.67。该结果与彭汉帮^[10]的研究相比,最大相关系数对应的滞后时间提前了 1 个月,这一差异可能和两个研究选用的区域、资料和 ENSO 事件样本数等不同有关。

为了研究南海北部海域不同区域温跃层上界深度对 ENSO 的具体响应特征,本文进一步计算了

表 1 7 次 ENSO 事件开始和结束时间

Tab.1 Start and end time of 7 ENSO events

时段	厄尔尼诺				拉尼娜		
开始	1997年4月	2002年5月	2009年6月	2014年4月	1998年7月	2007年8月	2010年6月
结束	1998年4月	2003年3月	2010年4月	2016年4月	2000年6月	2008年5月	2011年5月

表 2 ENSO 事件影响下南海北部温跃层特征逐月平均异常值与 Niño3.4 指数滞后相关性

Tab.2 Lag correlation coefficient between the monthly area-averaged anomalies of thermocline characteristics in the northern South China Sea and the Niño3.4 index influenced by the ENSO events

滞后月数	0	1	2	3	4	5
上界深度	-0.66	-0.67	-0.65	-0.62	-0.56	-0.46
厚度	-0.08	-0.07	-0.08	-0.10	-0.12	-0.15
强度	0.23	0.24	0.24	0.25	0.25	0.27

注:上界深度相关系数通过 99% 的置信水平检验

研究区域内各点温跃层月平均上界深度与Niño3.4指数滞后1个月的相关系数(见图5)。图中表明,南海北部海域温跃层上界深度与ENSO事件整体呈负相关关系:负相关性较强的区域(相关系数 <-0.4)主要分布在深海区,其中吕宋岛西侧负相关性最强,向北延伸至台湾岛,影响范围较大,相关系数极值接近 -0.8 ;正相关性较强的区域(相关系数 >0.4)主要分布在海南岛西南侧和越南沿岸,相关系数可达0.5左右。以上结果表明,ENSO对南海北部温跃层

上界深度的影响机制在深海区和陆架区截然相反,分别表现为负相关和正相关特征。

为进一步探究不同季节ENSO事件对南海北部温跃层上界深度的影响,分别计算了厄尔尼诺和拉尼娜事件期间各月份温跃层平均上界的深度异常值(见图6和图7),并选取1月、4月、7月和10月分别代表4个季节。

图6表明,厄尔尼诺期间南海北部海域温跃层上界深度异常在不同季节存在明显差异,最显著的特征是水深超过200m的深水区表现出明显的西北—东南向“跷跷板”异常分布。冬季和秋季温跃层上界深度异常更为明显,尤其是冬季,西北区域出现大范围明显负异常,最大可达 -20 m ,而东南区域则表现为正异常。这一结果表明,厄尔尼诺期间秋冬季节南海北部深水区温跃层上界深度,在西北区域较气候态变浅、东南区域较气候态变深,春季则呈相反态势。ENSO主要通过改变风场、环流和海表面热通量,影响南海北部温跃层上界深度。冬秋季节温跃层上界深度的异常分布表明,风场异常可能是造成其西北—东南向“跷跷板”变化的主要原因。本文对风应力数据和表层环流数据进行去趋势和一年低通滤波处理,减去气候态月平均值后,得到厄尔尼诺期间的风应力异常值(见图8)和表层环流异常值(见图9)。

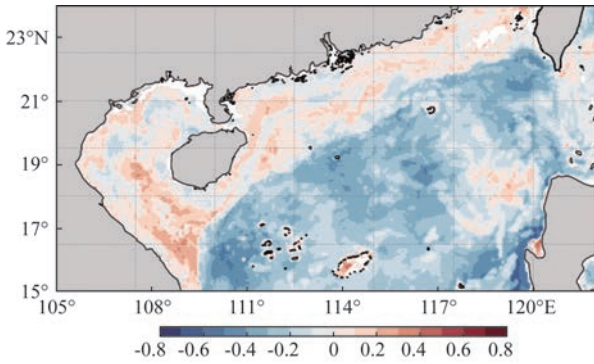


图5 ENSO期间南海北部温跃层滞后1个月月平均上界深度与Niño3.4指数相关系数分布

Fig. 5 Distribution of correlation coefficient between monthly average upper boundary depth and Niño3.4 index after one month lag of the thermocline in the northern South China Sea during ENSO

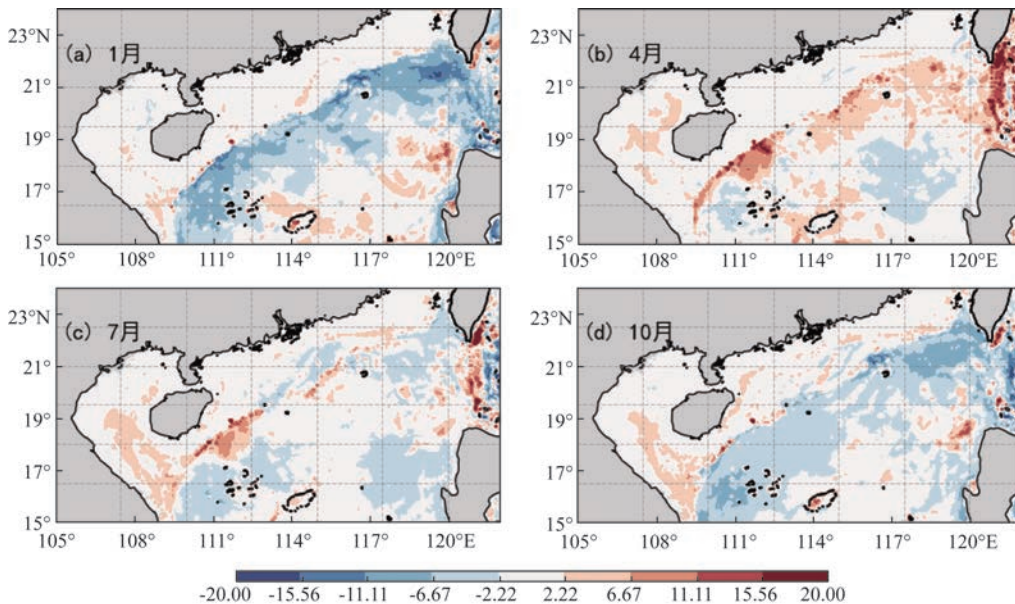


图6 厄尔尼诺期间南海北部温跃层各月上界深度异常值(单位:m)

Fig.6 Abnormal upper boundary depth of thermocline in northern South China Sea during El Niño (unit: m)

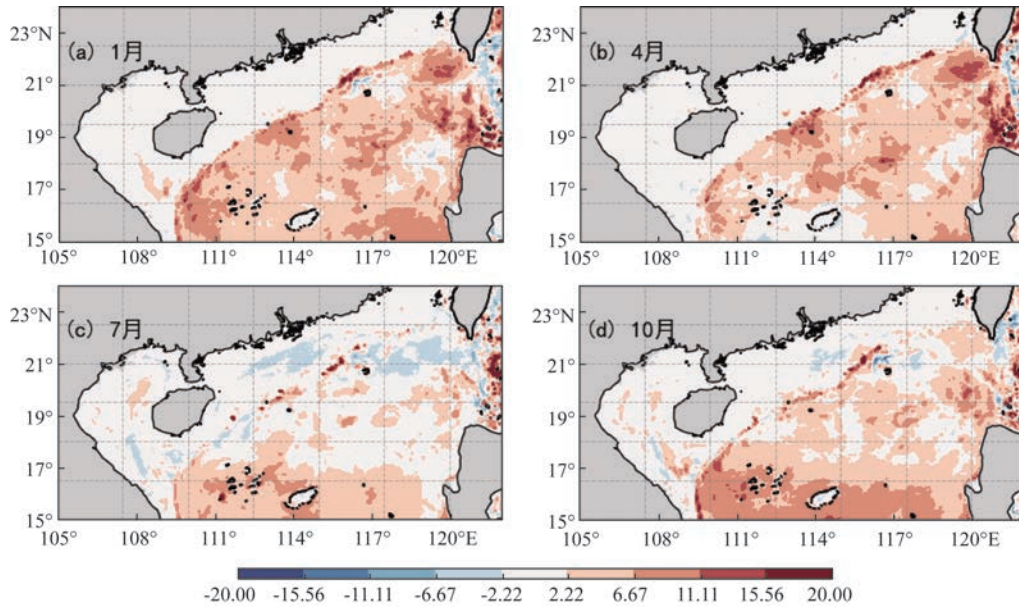


图7 拉尼娜期间南海北部温跃层各月上界深度异常值(单位:m)

Fig.7 Abnormal thermocline upper boundary depth in the northern South China Sea during La Niña (unit: m)

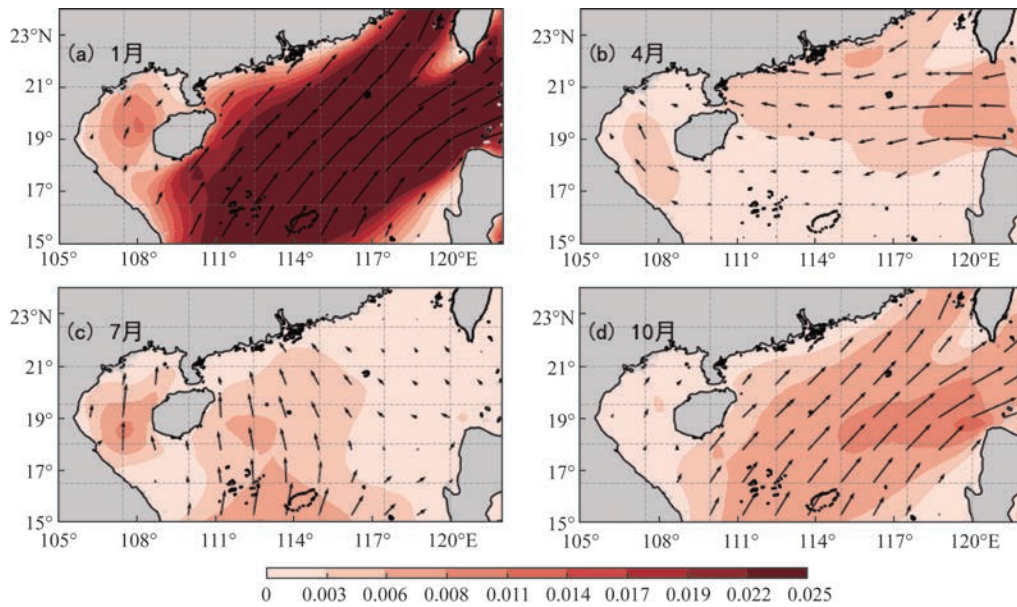


图8 厄尔尼诺期间南海北部风应力异常(单位: N/m^2)

Fig.8 Abnormal wind stress in the northern South China Sea during El Niño (unit: N/m^2)

厄尔尼诺期间,冬季和秋季均出现东南风异常(见图8a、8d),冬季异常更为明显,说明冬秋季节东北季风减弱,西北向Ekman输运相应减少,导致西北海域海表面高度较常年偏低;根据温跃层上界深度与海表面高度的关系,温跃层上界深度相应变浅。与此相对应,东南吕宋岛西侧海域离岸Ekman

输运也相应减弱,温跃层上界深度较常年加深。同时,正常年份秋冬季南海北部表层环流受较强气旋式环流控制,该环流通过平流效应^[4],将西北海域冬季Ekman输运堆积的海水输送到越南东部海域;而厄尔尼诺期间,该海域表层环流异常呈反气旋式(见图9a、9d),表明气旋式环流减弱,向越南东部的

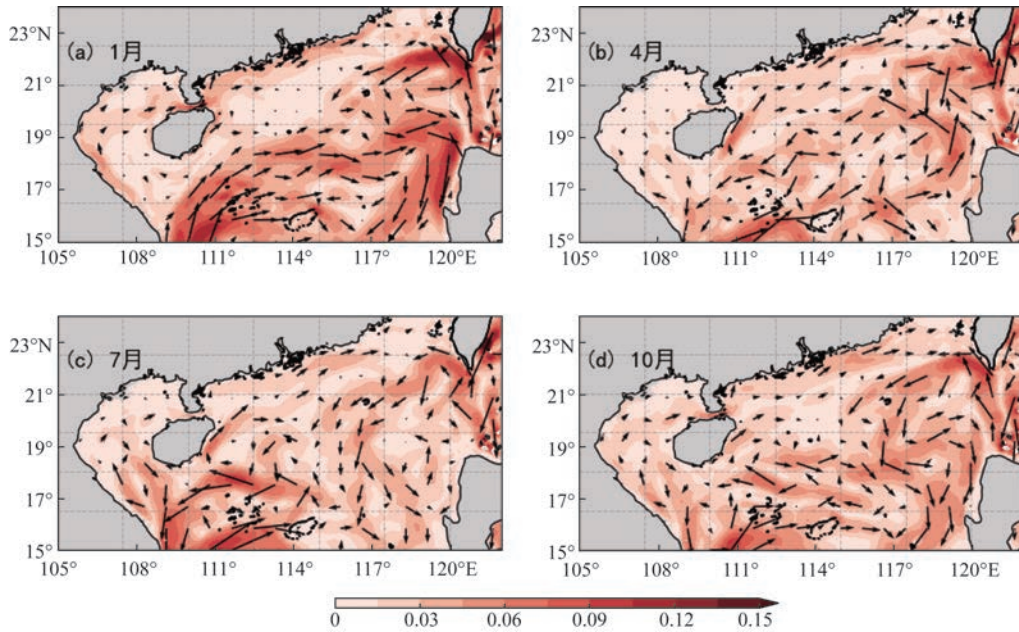


图9 厄尔尼诺期间南海北部表层环流异常(单位:m/s)

Fig.9 Abnormal surface circulation in the northern South China Sea during El Niño (unit: m/s)

海水输运减弱,因此越南东侧温跃层上界深度也相应变浅。

春季温跃层上界深度在北部和南部分别表现为弱加深和弱变浅,这与该季节出现的东风异常有关(见图8b)。异常增大的东风引发更强的北向Ekman输运,导致北侧温跃层加深,南侧深层水上升补充,温跃层相应变浅;春季表层环流异常值较小(见图9b),对温跃层的影响不明显。夏季南海北部海域温跃层上界深度整体呈负异常,较气候平均态整体变浅。图8c显示,厄尔尼诺期间夏季虽然出现偏南风异常,但风力异常较弱,动力因素使得“西北变浅、东南加深”效应有限;海南岛东南侧的正异常,推测与该海域较强的东向平流作用有关(见图9c)。热力变化可能是夏季温跃层上界深度异常的主导因素,前人研究^[19-20]表明,厄尔尼诺期间Walker环流减弱,南海区域呈现异常下沉气流,云量减少,到达海面的短波辐射通量值增加,海水垂直混合相应减弱,进而使温跃层上界深度变浅。

拉尼娜期间南海北部温跃层上界整体加深(见图7),这种一致的变化说明热力因素可能是造成其异常的主要原因。事实上,拉尼娜事件会引起Walker环流加强^[19-20],导致海面短波辐射通量减少,海水层化减弱,混合作用增强,使得温跃层上界深

度下沉。为量化验证这一结论,本文对短波辐射通量数据同样进行去趋势和一年低通滤波处理,减去气候态月平均值后,得到拉尼娜期间的短波辐射通量异常值。拉尼娜期间各月份区域平均温跃层上界深度异常值和短波辐射通量异常值的相关系数为-0.51,表明二者具有较好的负相关性。

为进一步分析二者的关系,将各次拉尼娜事件中逐月温跃层上界深度异常和短波辐射通量异常进行拟合,结果发现:1998年7月—2000年6月超强拉尼娜事件中,温跃层上界深度异常对短波辐射通量异常的相应较强;2007年8月—2008年5月和2010年6月—2011年5月两次中等强度拉尼娜事件中,上述响应相对较弱。超强事件和中等强度事件中,温跃层上界深度与短波辐射通量异常的相关系数分别为-0.93和-0.89。图10展示了按所有事件、超强事件和中等强度事件分别拟合的结果,表明对拉尼娜事件强度进行区分后,二者的线性关系更为显著。在强拉尼娜事件和中等拉尼娜事件中,短波辐射通量每减少105.9 KJ和380.2 KJ,温跃层上界深度相应增加1 m,表明不同强度拉尼娜事件下,南海北部温跃层上界深度对辐射通量的响应程度不同。然而,该结果仅基于1次超强和2次中等强度拉尼娜事件,可能存在偶然性,其普适性和物理机

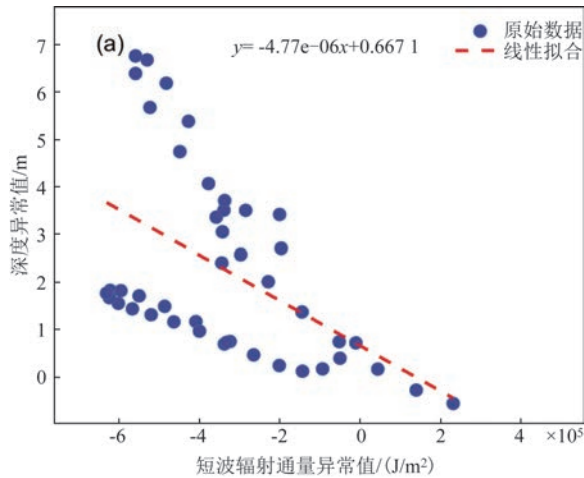


图10 拉尼娜期间南海北部温跃层上界深度异常值和短波辐射通量异常值拟合结果

Fig.10 Fitting results of thermocline anomaly and short wave radiation flux anomaly in northern South China Sea during La Niña event

制仍有待进一步研究。

以上分析表明,ENSO不同位相通过不同机制影响南海北部温跃层上界深度:暖位相(厄尔尼诺)发生时,秋冬季节温跃层上界深度异常可能主要受风应力异常和环流异常导致,春季温跃层上界深度异常则主要受风应力异常影响;冷位相(拉尼娜)发生时,短波辐射通量异常可能对温跃层上界深度的异常变化起重要作用。

4 结论

本文采用GLORYS12V1等再分析资料,基于垂直梯度法判别温跃层,分析了南海北部海域温跃层上界深度、厚度和强度的季节特征,及其与ENSO事件的相关性,重点研究了温跃层上界深度对ENSO冷暖事件的不同响应机制。主要结论如下:

①南海北部海域深海区常年存在永久性温跃层,陆架区季节性温跃层只在6—9月存在。总体来说,温跃层上界深度冬季最深、夏季最浅,这主要是由于不同季节太阳辐射差异导致海表温度不同。温跃层强度和厚度的季节变化与上界深度基本呈相反特征,强度夏季最强、冬季较弱,厚度春夏较厚、秋冬较薄。

②南海北部海域温跃层上界深度分布特征受

季风影响显著,冬季和夏季在西北—东南方向呈现明显的“跷跷板”分布。冬季受东北季风和吕宋冷涡影响,东南吕宋岛附近海域温跃层较浅,最浅只有20 m,西北陆架区附近海域温跃层较深,最深可达90 m;夏季受西南季风驱动的东南向Ekman输运影响,南海北部温跃层上界深度表现为西北浅、东南深的特征。

③ENSO事件影响下,南海北部海域温跃层平均上界深度与Niño3.4指数存在较强的负相关关系,表明ENSO事件对该海域温跃层上界深度影响较大。月尺度滞后相关性分析表明,温跃层上界深度与Niño3.4指数在滞后1个月时相关性达到最强。

④南海北部海域温跃层上界深度与Niño3.4指数整体呈负相关,尤其在深海区。ENSO的不同位相通过不同机制影响南海北部温跃层上界深度,厄尔尼诺发生时主要通过风应力和环流异常影响温跃层上界深度,秋冬季较强的东南风异常导致西北海域温跃层大范围负异常和东南海域正异常,春季的东风异常导致北部温跃层变深、南部变浅,夏季南风异常较弱,可能受短波辐射增加影响,温跃层上界深度整体变浅;拉尼娜发生时主要通过热力异常影响温跃层上界深度,拉尼娜期间南海北部海域短波辐射减少,温跃层上界深度异常与短波辐射通量异常表现出良好的相关性和线性拟合关系,南海北部海域各季节温跃层上界深度均表现出总体加深的特征。

参考文献:

- [1] 毛汉礼, 邱道立. 全国海洋综合调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 1964.
MAO H L, QIU D L. National comprehensive marine survey report [M]. Beijing: Science Press, 1964.
- [2] LIU Q Y, JIA Y L, LIU P H, et al. Seasonal and intraseasonal thermocline variability in the central south China Sea[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(23): 4467-4470.
- [3] 陈希, 沙文钰, 李妍. 南海北部海区温跃层分布特征及成因的初步分析[J]. 海洋预报, 2001, 18(4): 9-17.
CHEN X, SHA W Y, LI Y. The elementary analysis for the distribution character of thermocline in the area of South China Sea [J]. Marine Forecasts, 2001, 18(4): 9-17.
- [4] 兰健, 鲍颖, 于非, 等. 南海深水海盆环流和温跃层深度的季节变化[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 436-445.
LAN J, BAO Y, YU F, et al. Seasonal variabilities of the circulation and thermocline depth in the South China sea deep

- water basin[J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(4): 436-445.
- [5] 胡希声. 夏季南海北部温跃层特征的数值模拟研究[D]. 广州: 中山大学, 2006.
HU X S. The numerical simulation on the characters of thermocline in the north of South China Sea in summer[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2006.
- [6] 蒋国荣, 郝少东, 杜涛, 等. 南海北部温跃层逐月变化特征分析[J]. *海洋预报*, 2011, 28(3): 40-45.
JIANG G R, HAO S D, DU T, et al. Monthly variabilities of the thermocline in the Northern South China Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2011, 28(3): 40-45.
- [7] 田永青, 黄洪辉, 巩秀玉, 等. 2013年南沙群岛海域温跃层的季节变化及形成机理[J]. *海洋学报*, 2017, 39(12): 20-31.
TIAN Y Q, HUANG H H, GONG X Y, et al. The seasonal variation of the thermocline and its formation mechanism in the sea area around Nansha Islands in 2013[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(12): 20-31.
- [8] FAN W, SONG J B, LI S. A numerical study on seasonal variations of the thermocline in the South China Sea based on the ROMS[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(7): 56-64.
- [9] PENG H B, PAN A J, ZHENG Q A, et al. Analysis of monthly variability of thermocline in the South China Sea[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(2): 205-215.
- [10] 彭汉帮. 南海温跃层变化及其对 ENSO 的响应研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
PENG H B. Analysis of thermocline variability in the South China Sea and its response to the ENSO events[D]. Xiamen: Xiamen University, 2017.
- [11] 方雪娇. 南海温跃层深度的季节和年际变化特征分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
FANG X J. Seasonal and interannual variations of the thermocline depth in the South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [12] PENG H B, PAN A J, ZHENG Q A, et al. A study of response of thermocline in the South China Sea to ENSO events[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(4): 1166-1177.
- [13] 翁博超, 王玉. 南海温跃层深度对厄尔尼诺事件响应的空间不对称性[J]. *海洋科学进展*, 2023, 41(1): 40-53.
WENG B C, WANG Y. The spatial asymmetry of the South China Sea thermocline depth in response to El Nino events[J]. *Advances in Marine Science*, 2023, 41(1): 40-53.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.7-2007 海洋调查规范 第7部分: 海洋调查资料交换[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.7-2007 The specifications for oceanographic survey—Part 7: exchange of oceanographic survey data[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [15] 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 Y. Seasonal dynamic processes of the South China Sea mixed layer and thermocline[D]. Qingdao: Qingdao Ocean University, 2002.
- [16] 杨海军, 刘秦玉. 南海上层水温分布的季节特征[J]. *海洋与湖沼*, 1998, 29(5): 501-507.
YANG H J, LIU Q Y. The seasonal features of temperature distributions in the upper layer of the South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, 29(5): 501-507.
- [17] 刘科峰, 蒋国荣, 陈奕德, 等. 基于卫星漂流浮标的南海表层海流观测分析[J]. *热带海洋学报*, 2014(5): 13-21.
LIU K F, JIANG G R, CHEN Y D, et al. Analysis of upper-ocean surface currents of the South China Sea derived from satellite-tracked drifter data[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2014 (5): 13-21.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 33666-2017 厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 33666-2017 Identification method for El Niño / La Niña events[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [19] KLEIN S A, SODEN B J, LAU N C. Remote sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(4): 917-932.
- [20] WANG C Z. Atmospheric circulation cells associated with the El Niño-southern oscillation[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(4): 399-419.

Analysis of characteristics of thermocline in the northern South China Sea

GUO Yurong, WANG Ning*, HU Wangjiang, YAN Hengqian, ZHANG Yongchui

(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The seasonal characteristics of the thermocline in the northern South China Sea and its correlation with the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events are analyzed based on GLORYS12V1 and other reanalysis datasets. The results show that averaged thermocline upper boundary depth is deepest in winter and shallowest in summer due to the disparity of solar radiation in different seasons. The intensity and thickness of the thermocline show opposite seasonal characteristics to the upper boundary depth. Affected by monsoons and mesoscale eddies, the upper boundary depth of the thermocline presents an obvious seesaw distribution in the northwest-southeast direction in winter and summer, being deep in the northwest and shallow in the southeast in winter and vice versa in summer. The upper boundary depth shows a relatively strong negative correlation with the Niño3.4 index. Different phases of ENSO exert influence on the upper boundary depth of the thermocline through distinct mechanisms. During the El Niño events, abnormal wind stress and circulation are the main causes of the abnormal upper boundary depth. In the La Niña events, the abnormal deepening of the thermocline upper boundary depth is primarily attributed to the anomaly of shortwave radiation flux.

Key words: the northern South China Sea; thermocline; ENSO