

东海黑潮温度锋的三维结构特征分析

王兴宇, 纪棋严, 彭腾腾, 林夏艳, 贾晓燕, 韩磊

(浙江海洋大学 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022)

摘 要: 结合卫星遥感海表温度、三维再分析温度资料和数值模拟结果,研究了东海黑潮温度锋从海表到底层的三维结构特征。结果表明:东海黑潮海表温度锋在冬季和春季较强,秋季次之,夏季消失。多年平均的东海黑潮海表温度锋区范围主要在70~700 m水深区域,温度锋的中心线与黑潮的流轴大致平行,在济州岛以南的黑潮中段区域有北上的分支。受台湾暖流、黑潮及其分支的共同影响,在200 m以浅区域,东海黑潮温度锋在冬季和春季从海表到海底常年存在,夏季和秋季主要出现在水深50 m以下水层。东海黑潮和底层陆架水形成显著的温度锋,位置在顺着黑潮流向的左侧及下方深度为100~700 m的陆架区域,该区域的温度锋强度比同一位置的海表温度锋的强度大。受黑潮的路径、流幅宽度、深度和速度大小的影响,东海黑潮温度锋在陆架区域的影响深度兼具区域性差异和季节性差异,一般比黑潮流速0.2 m/s的到达深度深200 m左右,甚至可以影响到水深1 000 m左右。

关键词: 东海;黑潮;温度锋;三维结构特征

中图分类号: P731.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)01-0067-13

1 引言

东海黑潮海洋锋(简称“东海黑潮锋”)是东海最重要的水文特征之一,它是由高温、高盐、高水色和透明度大的黑潮水与低温、低盐、浑浊度高和透明度小的东海陆架水之间相互作用形成的。东海黑潮锋的结构特征在黑潮水与东海陆架水的相互交换,以及陆架区域海洋物质通量向大洋区域的输送中都起着重要作用。东海黑潮锋对我国东部旱涝状况、东海渔业生产、海洋环境保护以及海洋军事活动等方面具有重要的影响。

东海黑潮温度锋是指用海水温度的水平梯度来衡量东海高温黑潮水与低温陆架水之间温度变化显著的狭长过渡带。通过卫星遥感图片可以看到东海黑潮温度锋面的位置及锋区内存在涡旋结构^[1]。东海黑潮温度锋整体具有季节和年际变化,

锋强度增大时,位置也有较大变化^[2-4],温度锋的季节性变化也存在明显的区域性差异^[5-6]。受黑潮流量和路径的影响,东海黑潮温度锋的主体也具有明显的年际变化^[7],台湾岛东北部和九州岛西南部的平均经向位置存在反位相的年际变化规律^[8]。此外,东海黑潮锋也经常出现不同尺度的弯曲^[9],锋面形状随着黑潮的变化存在不同程度的波动^[10-12],并伴随着大量的锋面涡旋^[13-19]。

前人的研究主要偏重东海黑潮海表温度锋的描述和研究,很少涉及黑潮表层以下锋面结构特征。在水深50 m以下水层,向上涌升的低温水与较高温度的黑潮水相汇,仍可以形成较强的温度锋^[20]。基于海表的卫星遥感图像和低分辨率的现场观测资料,无法给出整个东海黑潮温度锋的全貌,因此,目前缺乏对东海黑潮锋的水平分布和垂向特征的进一步研究。东海黑潮温度锋具有较大的锋区面

收稿日期: 2021-02-02; 修回日期: 2021-03-31。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1401605);国家自然科学基金(41806004、41806030)。

作者简介: 王兴宇(1996-),男,硕士,主要从事海洋动力学研究。E-mail: wang_ux@tju.edu.cn

通讯作者: 纪棋严(1986-),男,讲师,博士,主要从事海洋数值模拟和资料同化研究。E-mail: jiqiyan@zjou.edu.cn

积,且锋强度会随着深度发生变化,使得东海黑潮锋面具有显著的三维结构特征。

本文基于多种资料对东海黑潮温度锋的三维结构进行分析,揭示以往研究较少涉及的表层以下温度锋的时空分布特征,为以后开展黑潮锋形成机制、锋区对物质输运和生态及渔业的影响以及中尺度海洋锋数值预报等工作提供研究基础。

2 数据和方法

2.1 数据

本文采用3种数据分析东海黑潮温度锋的三维结构特征。高分辨率卫星遥感海表面温度(Sea Surface temperature, SST)用于分析东海黑潮海表温度锋的特征,WOA13(World Ocean Atlas 2013)三维温度资料和HYCOM(HYbrid Coordinate Ocean Model)全球数值模拟结果用于分析东海黑潮锋的三维结构特征。3种数据详细介绍如下。

高分辨率卫星遥感SST资料为全球逐日海温-海冰融合产品(Operational Sea surface Temperature and sea Ice Analysis, OSTIA)数据^[21]。OSTIA是英国气象局(Met office)基于高分辨率海表面温度项目(Group for High Resolution Sea Surface Temperature, GHRST)提供的数据,使用AATSR(Advanced Along Track Scanning Radiometer)数据、SEVIRI(the Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager)数据、AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)数据、AMSR(Advanced Microwave Scanning Radiometer)数据、TMI(TRMM Microwave Imager)数据和实测数据制作的逐日的 $1/20^\circ$ 网格的SST产品。所有卫星数据参考并结合AATSR数据和浮标数据调整误差,使用最优插值算法生成,产品均方根误差小于 0.6°C 。本文使用的OSTIA的数据时间范围为2007年1月1日—2019年12月31日(网址:<https://data.nodc.noaa.gov/ghrsst/L4/GLOB/UKMO/OSTIA>)。

WOA13三维温度数据是美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmosphere Administration, NOAA)的国家海洋数据中心海洋气象实验室的海洋气候态再分析数据集产品^[22]。WOA13数据的水平分辨率有 $1/4^\circ\times 1/4^\circ$ 、 $1^\circ\times 1^\circ$ 和 $5^\circ\times 5^\circ$ 3

种,时间上包括月平均、季平均和年平均(网址:<https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>)。本文选取WOA13数据分辨率为 $1/4^\circ\times 1/4^\circ$ 的月平均数据,该数据包括了多年平均、1955—1964年、1965—1974年、1975—1984年、1985—1994年、1995—2004年和2005—2012年多个时间段的月平均数据。选取的多年平均数据在垂向上从 $0\sim 1\,500\text{ m}$ 分了57层,其中 $0\sim 100\text{ m}$ 每 5 m 一层,共21层, $100\sim 500\text{ m}$ 每 25 m 一层, $500\sim 1\,500\text{ m}$ 每 50 m 一层。WOA13数据是平均格点化的插值数据,在表现海洋锋强度上比实际值要低,但WOA13数据在表现锋区,特别是锋轴线上位置和强度的变化特点上具有较好的效果^[23],可以分析温度锋强度随空间变化的分布特点以及随季节的变化规律等,具有重要的参考价值^[24]。

由于WOA13的分辨率较低,为更好地分析东海黑潮温度锋的三维结构特征以及流场对海洋温度锋的影响,本文还使用分辨率较高的HYCOM(GLBu0.08/expt_91.1)的数值模拟结果作对比分析。该数据时间段为2014年4月4日—2016年4月18日,本文仅下载了2015年1月1日—12月31日全年的数值模拟结果作为辅助分析(网址:<https://www.hycom.org/>)。该模式结果同化了卫星遥感及观测海表温度数据以及从抛弃式测温仪器(eXpendable BathyThermograph, XBT)、Argo和其他浮标获得的垂向温盐剖面的观测资料。该数据水平分辨率为 $1/12^\circ\times 1/12^\circ$ ($\sim 0.08^\circ$),数据包含了海表高度、40层的温度、盐度、东向流速 u 和北向流速 v 。垂向从 $0\sim 5\,000\text{ m}$ 分为40个标准层,其中 $0\sim 12\text{ m}$ 每 2 m 一层, $15\sim 50\text{ m}$ 每 5 m 一层, $60\sim 100\text{ m}$ 每 10 m 一层, 125 m 层, $150\sim 350\text{ m}$ 每 50 m 一层, $400\sim 1\,000\text{ m}$ 每 100 m 一层, $1\,500\sim 3\,000\text{ m}$ 每 500 m 一层, $3\,000\sim 5\,000\text{ m}$ 每 $1\,000\text{ m}$ 一层。

2.2 方法

为了研究东海黑潮锋的特征,本文将研究海域范围设置为 $120^\circ\sim 131^\circ\text{E}$, $21^\circ\sim 33^\circ\text{N}$ (见图1)。由于本文使用的3种数据的地理范围均为全球,因此,首先分别从这些数据中提取出本文研究区域范围的数据,再依次进行预处理。对2007—2019年OSTIA日平均SST数据进行计算,求出多年月平均

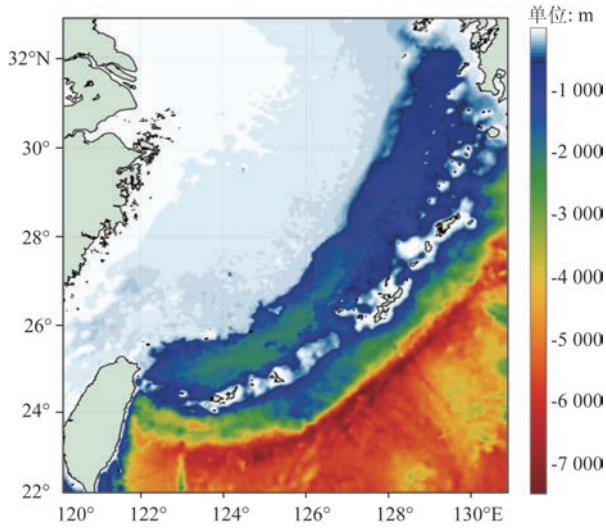


图1 研究区域示意图及水深图(红色虚线方框内为研究区域)

Fig.1 Schematic diagram of the study area and water depth map (the study area is in the red dotted box)

SST,在此基础上计算月平均SST梯度来表示温度锋。用同样方法计算出HYCOM月平均的三维温度场、温度梯度和流场,WOA13数据则直接用于计算温度梯度。由于东海海域内浙闽沿岸锋也特别明显,为更好地突出东海黑潮温度锋的变化特征,在作温度锋面图时将水深小于70 m且温度梯度小于0.01 °C/km的区域设置为空白。本文采用各季节的代表性月份2月、5月、8月和11月,分别表示冬季、春季、夏季和秋季,来分析东海黑潮锋的三维结构的季节性变化特征。

本文采用温度梯度法表示温度锋,梯度大小表示锋强,范围表示锋区。首先采用Sobel方法计算每点在 x 和 y 方向的梯度值 $\frac{\partial T}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial T}{\partial y}$ 及总梯度的大小,公式为:

$$grad = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \times \frac{1}{4} \cdot T, \\ \frac{\partial T}{\partial y} &= \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \times \frac{1}{4} \cdot T \end{aligned} \quad (2)$$

式中, T 表示以要计算的点为中心的 3×3 矩阵,其中元素是点 x 、 y 及其周边点的温度值。Sobel方法体现了周围点对中心点的影响,在一定程度上消去了数据噪音。关于温度梯度的临界值,目前还没有统一的标准,前人主要根据经验确定。为了体现表层强温度锋和底层弱温度锋的特征,本文分别以0.02 °C/km和0.01 °C/km为强温度锋和弱温度锋的梯度阈值,通过这两个阈值来选取东海黑潮温度锋的锋区。采用Canny算法对温度锋区进行处理来检测锋面中心线,将以某一点 x 、 y 为中心点作 3×3 矩阵,再将该矩阵分成3个方向,若该点梯度值为任意方向上的极大值,则记录该点及其值,否则即为0,将处理后的点做成一个位置与原图相同的矩阵后会发现这些点连成了一条条线,这些线就是锋面中心线,也就是锋面位置。锋面中心线代表锋面核心位置,其获取方式不受梯度临界值影响,给锋面研究带来极大益处。

3 结果分析

3.1 海表温度锋特征

研究海域海表温度在4个季节大体呈西北低东南高的趋势,等温线基本呈西南-东北走向(见图2)。冬季,江苏沿岸、长江口及杭州湾周边海域温度在5~7 °C,长江口外海往东海陆架方向有明显低温冷舌,高温区主要在黑潮流域,台湾东侧有水温约24 °C的暖舌,黑潮流域等温线密集,温度从近岸的6 °C跨越到黑潮周围的22 °C。春季,海域温度整体升高,近岸升高明显,黑潮流域温度大约平均升高2 °C,26 °C的暖水舌出现在黑潮右侧,温度跨度16~26 °C。夏季,研究海域整体温度都比较高,大部分区域温度在27 °C以上,长江口及舟山海域有低温区,其附近有比较密的等温线,黑潮流域海水温度在29 °C左右,等温线几乎消失。秋季,黑潮流域温度在24 °C左右,向西北和近岸递减,长江口、杭州湾及舟山附近海域温度在18 °C左右。

图2和图3给出了3种数据呈现的东海黑潮海表温度锋的季节性分布特征。温度锋整体在冬季和春季较强,夏季几乎消失,秋季较弱。冬季,东海黑潮海表温度锋较强,主要分布在等深线70~200 m的海域,其锋面强度在0.02 °C/km以上,边缘区的锋

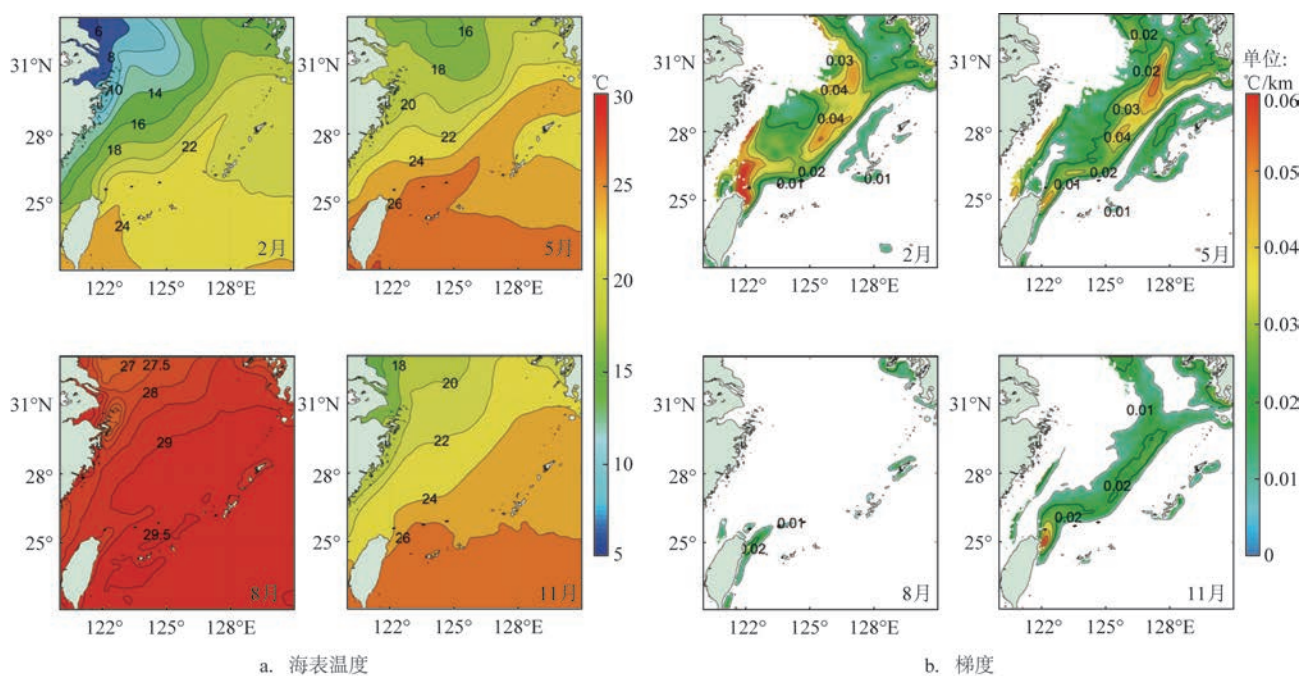


图2 OSTIA 多年月平均海表温度及梯度

Fig.2 OSTIA's multi-year monthly average sea surface temperature and gradient

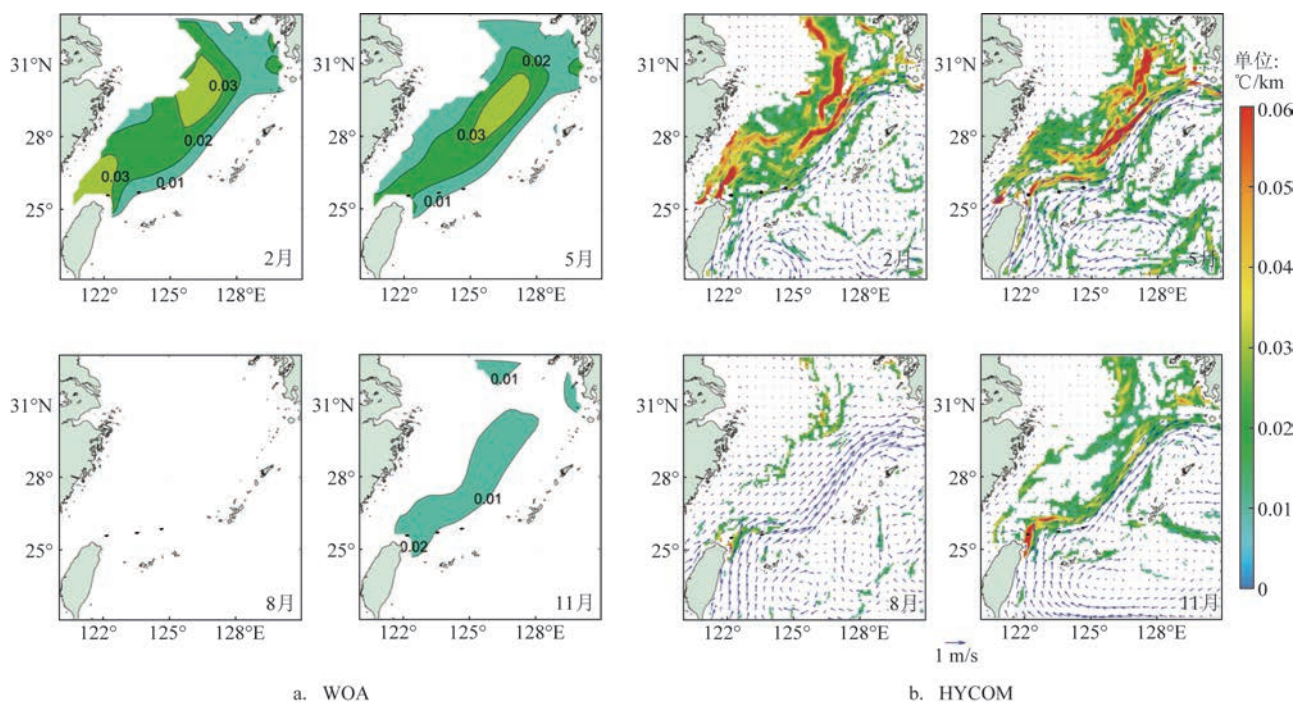


图3 WOA13资料和HYCOM模式结果在表层(0 m)4个季节温度锋的水平空间分布

Fig.3 The horizontal spatial distribution of temperature fronts in the four seasons at the surface layer (0 m) in WOA13 data and HYCOM model results

面强度约为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。春季,温度锋的空间分布趋势和冬季类似,但强度整体比冬季弱。夏季,东海黑潮海表温度锋几乎消失。秋季,东海黑潮海表温度锋为弱温度锋,强度约为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。引起东海黑潮海表温度锋季节性变化的主要原因是:冬季,东海大陆架受强风和强冷却的共同作用,垂直混合强烈形成的低温东海陆架水,与陆坡上仍然维持层化的高温黑潮水相汇,形成明显的东海黑潮锋;夏季,由于东海陆架比较浅,海水增温迅速,层化作用较强,导致东海陆架水和黑潮水温度差异很小,表层温度锋消失;春季和秋季属于过渡季节,锋面强度和特征也处于过渡状态。

3种数据呈现的海表温度锋在范围和强度上存在一定的差异。冬季,在台湾岛北部和东北部区域,OSTIA和HYCOM的温度锋强度在 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 以上,但WOA13仅为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右;在黑潮流域中部以及对马暖流流经区域(127°E , 30°N)附近海域,OSTIA和WOA13的温度锋范围和强度也比较大,但OSTIA的温度锋强度最大值在 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 以上,而WOA13仅约为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,HYCOM则呈现狭长的条带状锋,强度可达 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。春季,OSTIA在台湾东北侧及黑潮流域中部的锋面强度分别可达 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 和 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,WOA13仅在黑潮流域中间有较强的温度锋,其强度为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,HYCOM的温度锋在黑潮流域中部和济州岛南部区域有两处明显的高值区,强度约为 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。夏季,WOA13没有呈现黑潮海表温度锋,但OSTIA和HYCOM数据在台湾东北角有小面积的温度锋出现。秋季,OSTIA和WOA13温度锋区面积比HYCOM大,且OSTIA在台湾东北部和黑潮流域中部温度锋的强度分别可达 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 和 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

综合而言,WOA13数据计算得到的温度锋强度比OSTIA和HYCOM的结果弱,但三者温度锋的空间分布特征较一致。不同的是,HYCOM的温度锋高值区呈明显的条带状。3种数据表现特征差异的原因可能是:WOA13数据分辨率较粗,且经过格点化处理,只能给出大体特征,无法表现出局部小区域的温度锋高值;HYCOM数据是数值模拟结果,温度的模拟效果受初始场、流场和热通量强迫等多因素的影响,模拟精度和卫星遥感数据相比有一定

的差异;OSTIA的分辨率最高,资料精度也较高,刻画的锋面特征比较精细。

3.2 温度锋三维特征

从东海陆架地形分布特征来看,东海陆架水和东海黑潮相互作用主要集中在陆架浅海区域,但东海黑潮本身的影响深度大于 200 m ,能达到 700 m 以深的陆坡区域。本文仅给出WOA13数据和HYCOM模式4个季节在 50 m 、 70 m 、 150 m 和 200 m 层的温度锋(见图4)及HYCOM温度锋和流场的分布特征(见图5)。

冬季,WOA13和HYCOM两种数据在 $50\sim 200\text{ m}$ 层均表现出明显的温度锋。WOA13 50 m 层的温度锋在台湾东北部区域和济州岛南部海域强度较大,可达 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$;在台湾岛东部海域 50 m 和 70 m 层没有温度锋,但在水深 $150\sim 200\text{ m}$ 出现明显的温度锋;在日本九州岛西南海域, $50\sim 70\text{ m}$ 层温度锋强度约为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 200 m 层增强至 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。HYCOM数据显示的各层温度锋范围和分布趋势与WOA13类似,但锋强度比WOA13大。从 50 m 和 70 m 层的HYCOM温度锋及对应的流场分布特征来看,台湾北部海域温度锋受黑潮和台湾暖流的共同影响,黑潮锋中段附近左侧有北上的清晰条带状温度锋,可能是黑潮分支北上(对马暖流的来源之一)入侵大陆架形成的;台湾东部和九州岛西南部在 200 m 层均有显著的温度锋,是高温黑潮水与底层低温陆架水相互作用形成的。

春季,WOA13在 50 m 层的济州南部海域的温度锋的最大值可达到 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,表明该区域 50 m 层温度锋在春季增强, 70 m 和 150 m 层的温度锋和冬季相比有增强趋势(见图5)。HYCOM在 $50\sim 200\text{ m}$ 的温度锋显著,黑潮流域呈现出更加清晰的条带状,且几乎平行于黑潮的主轴,黑潮中段的济州岛南部海域也有条带状的温度锋,分布大约与黑潮的温度锋平行,黑潮北上的分支减弱。

夏季,WOA13和HYCOM温度锋的锋区范围比较相近。和表层相比, 50 m 层的温度锋有两个显著的特征:(1)台湾东北侧开始出现温度锋,强度约为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$;(2)黑潮中段济州岛以南的温度锋比表层强,强度可达 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。黑潮中段和北段并没有明显的温度锋存在,而北部到济州岛南部海域

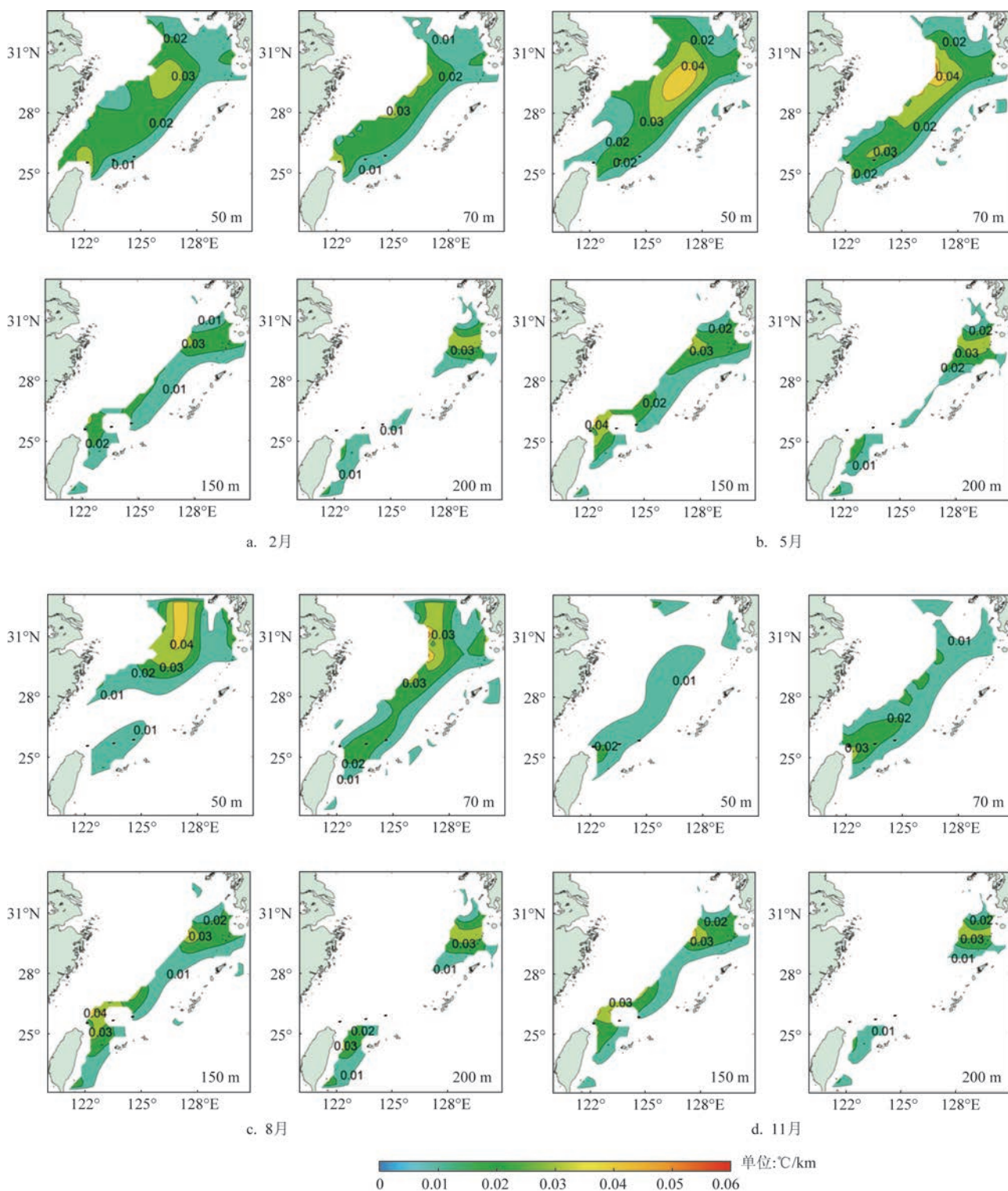


图4 WOA13资料各垂直层四季温度锋的水平空间分布

Fig.4 The horizontal spatial distribution of the four-season temperature fronts in each vertical layer of WOA13 data

有大面积高强度的温度锋区,推测其来源可能是台湾暖流与东海陆架水相互作用形成的。70 m层,

WOA13 的温度锋沿着黑潮流域呈带状分布, HYCOM 在黑潮流域中部和北部的温度锋并不明

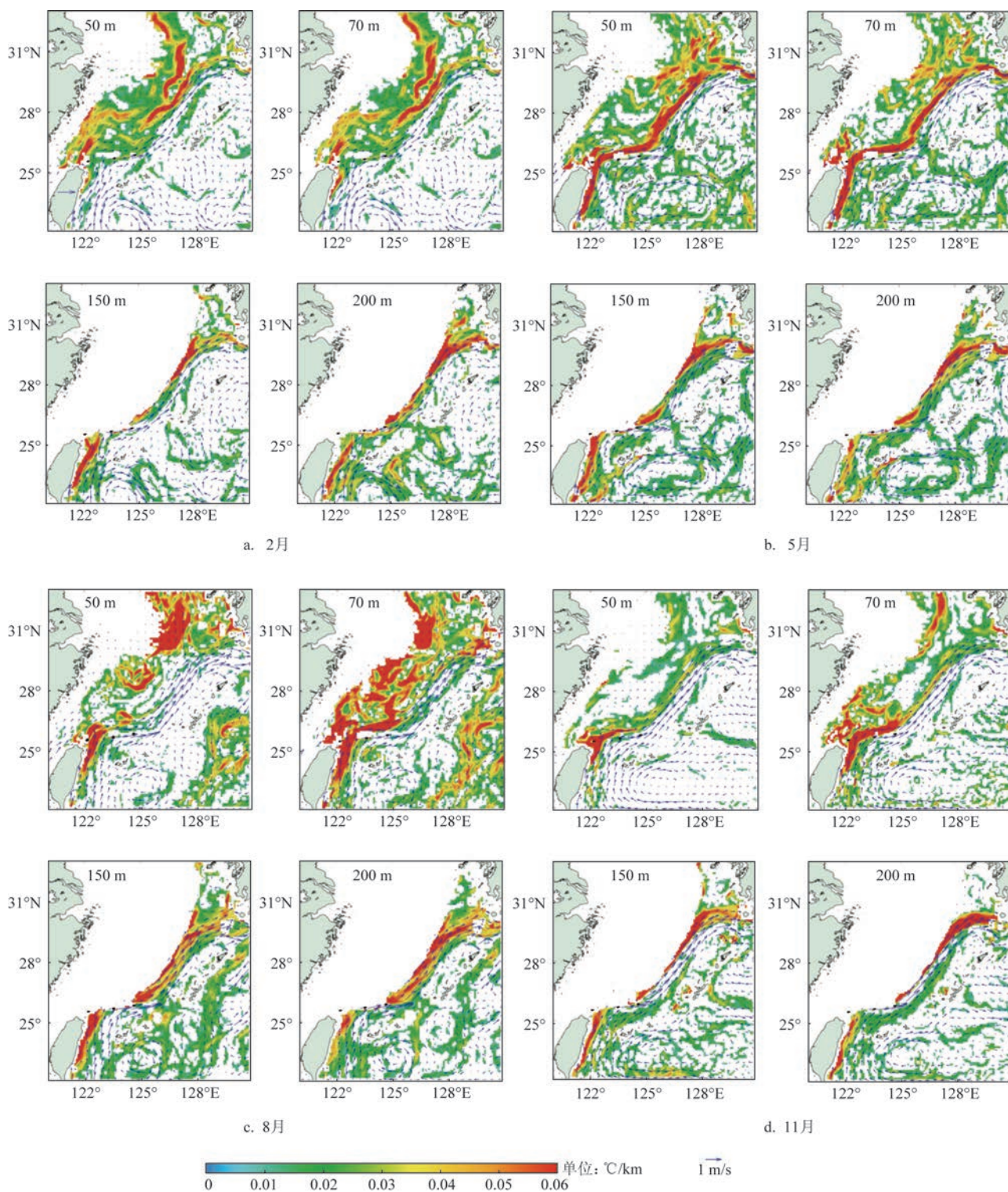


图5 HYCOM模式各垂直层四季温度锋和流场的水平空间分布

Fig.5 The horizontal spatial distribution of the four seasons temperature fronts and flow fields in each vertical layer of the HYCOM model

显。150~200 m层, WOA13 和 HYCOM 黑潮温度锋沿着黑潮方向呈连片的趋势, 表明 150 m 以深海

域温度锋的形成主要和黑潮有关。

秋季, WOA13 和 HYCOM 温度锋的锋区范围

主要集中在黑潮流域附近。50 m层温度锋强度约为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 台湾东侧有较强的温度锋, 可达到 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 但 HYCOM 在济州岛以南海域还出现和春季类似的条带状温度锋, 且和黑潮流域的温度锋成一定的夹角, 该温度锋可能是黑潮分支北上入侵大陆架形成的。70 m层和 150 m层的温度锋强度比 50 m层大。由于资料本身分辨率的影响, WOA13 在 200 m层的温度锋在黑潮流域中断, 而 HYCOM 资料结果表明黑潮温度锋在 200 m层依旧连续且平行于黑潮流轴呈条带状特征, 黑潮流速也较大。

3.3 温度锋断面特征

东海黑潮锋的温度锋区范围较大, 从各水深层的锋区范围和流场特征可以看出, 多年温度锋主要出现在东海海域水深 70~700 m 的陆架区域及周边 (见图 6)。为进一步分析东海黑潮温度锋三维结构的区域性差异, 本文分析了 SN1、SN2、PN 和 SN3 这 4 个断面的温度锋及流场的垂向特征。断面的选取基于这些考虑: (1) 断面要横切温度锋区的中心线和黑潮的流轴。考虑到各季节温度锋区大小并不一致, 为方便确定锋区的中心线, 温度锋区选用的是 2007—2019 年 OSTIA 多年平均海表温度锋区。在此基础上, 利用 Canny 算法提取并绘制了多年平均海表温度锋区的中心线 (见图 6)。图中可以看出多年平均的温度锋区中心线除了大致平行于黑潮主轴外, 在 $(129^{\circ}\text{E}, 29^{\circ}\text{N})$ 处有北向的分支, 该分支线周围较强的温度锋可能受黑潮北上的分支影响。(2) 断面尽可能出现在东海黑潮的不同区域, 以分析不同区域的垂向特征。(3) 选择已有的断面作为参考。PN 断面是横切东海黑潮中部主轴的标准断面, 也是研究黑潮最重要的断面之一, 因此, 本文选取 PN 断面为参照, 其他断面均平行于该断面。综上所述, SN1 断面横切台湾暖流和黑潮, 且位于温度锋中心线及黑潮转弯处, 用于分析台湾暖流和黑潮对温度锋的影响; SN2 断面和 PN 断面类似, 用于分析黑潮中段两断面之间的差异; SN3 断面横切温度锋中心线的两个分支, 用于考虑黑潮主轴和分支对温度锋的影响 (见图 6)。

SN1 断面横切台湾暖流和黑潮主轴, 也是黑潮弯曲的拐角之处, 在 200 m 以浅的陆架区域主要受

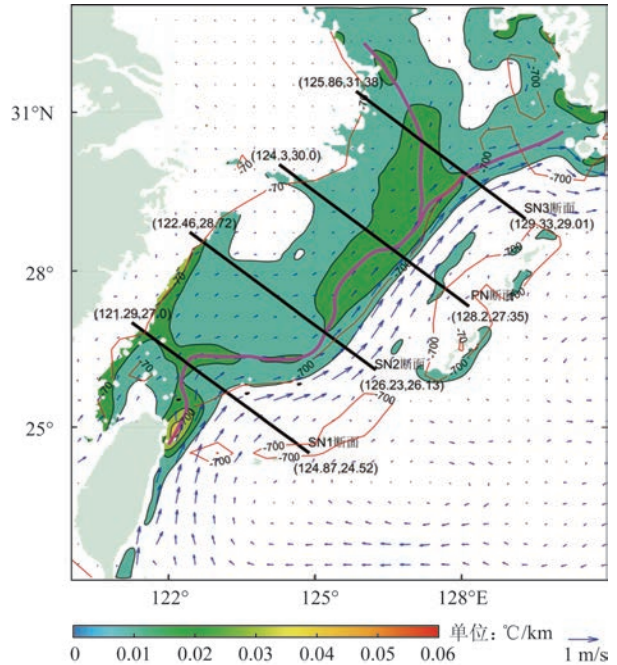


图 6 2007—2019 OSTIA 年平均海表温度锋及 HYCOM 年平均流场 (紫色实线表示温度锋中心线, 红色表示等深线)

Fig.6 2007—2019 OSTIA annual mean sea surface temperature front and HYCOM annual mean flow field (the purple solid line represents the center line of the temperature front, and the red represents the depth contour)

台湾暖流的影响, 在水深大于 1 000 m 的陆坡附近海域主要受黑潮主体的影响。该断面的温度锋和流速表现出不一样的季节性变化特征 (见图 7 和图 8)。在 200 m 以浅的陆架区域, 冬季和春季台湾暖流明显, 速度在 $0.2\sim 0.4\text{ m/s}$, 对应的温度锋由表及底均存在, 强度可以达到 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 以上; 夏季和秋季, 靠近陆坡边缘处有约 0.4 m/s 的流速, 可能是黑潮弯曲引起的, 对应的温度锋主要出现在表层以下。在水深大于 1 000 m 的陆坡附近海域, 冬季和夏季黑潮主体的流幅较窄, 主轴比较明显, 但冬季速度比较小, 约为 0.4 m/s , 夏季则在 0.6 m/s 左右; 对应的温度锋形态特征是宽且浅, 影响深度在 200~600 m。春季和秋季黑潮主体的流幅较宽, 主轴不明显, 流速也较小, 在靠近陆坡区域流速较大, 可能是黑潮在这两个季节弯曲导致的; 对应的温度锋形态是窄且深, 影响深度在 200~1 000 m。黑潮主体周围温度锋最强的区域出现在水深 400~600 m, 且

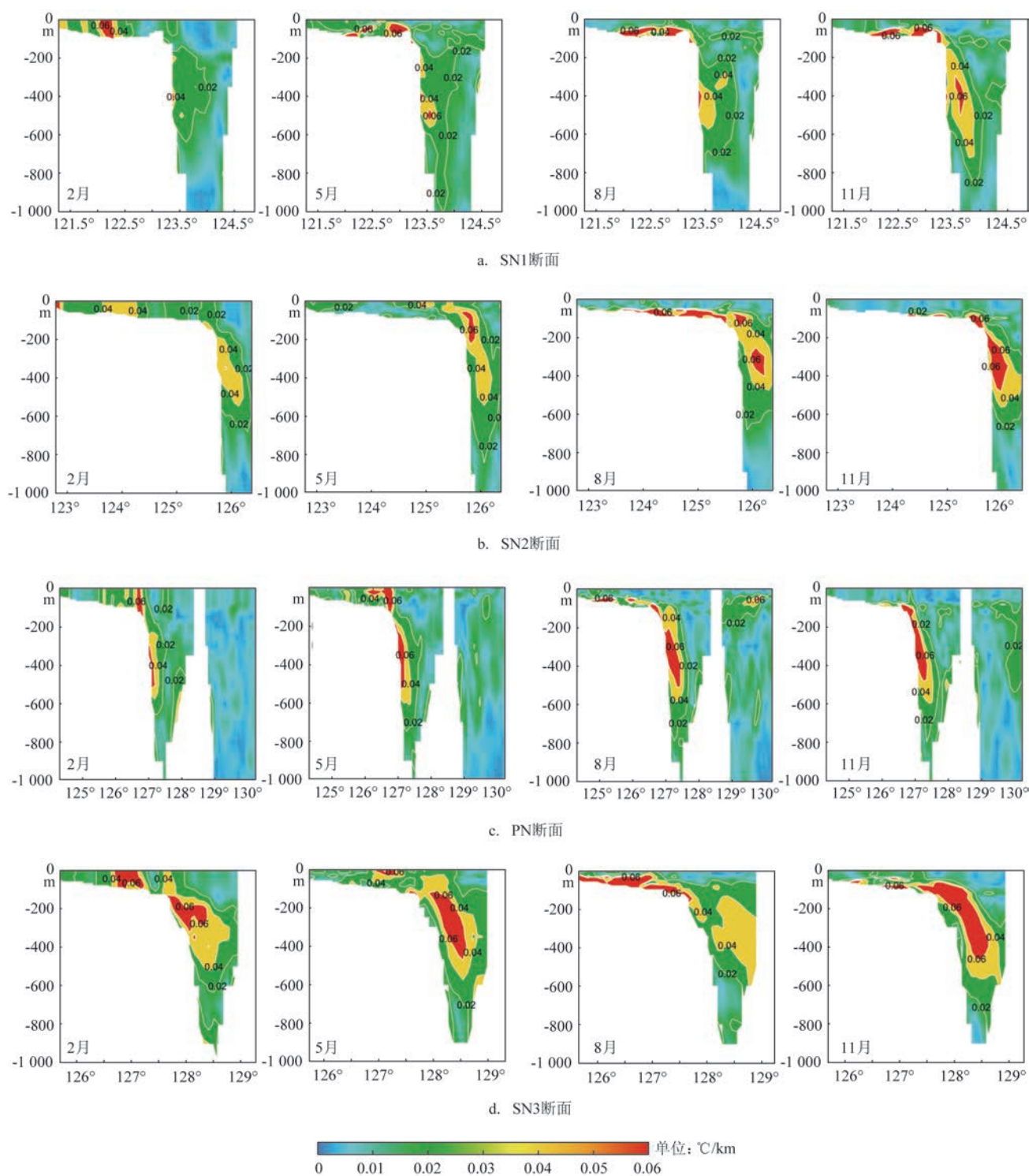


图7 HYCOM在4个断面的温度锋

Fig.7 The temperature fronts of HYCOM on the four sections

温度锋随冬春夏秋4个季节呈依次增强。

SN2断面在陆架浅海区域流速比较小,表明经过该断面的台湾暖流相对较弱,黑潮主体在陆坡区

域(见图8)。黑潮的流幅比较窄,流轴在各季节都比较明显,流速为0.2 m/s的黑潮水在各季节可到达深度都在600 m左右。SN2断面上水深200 m以浅

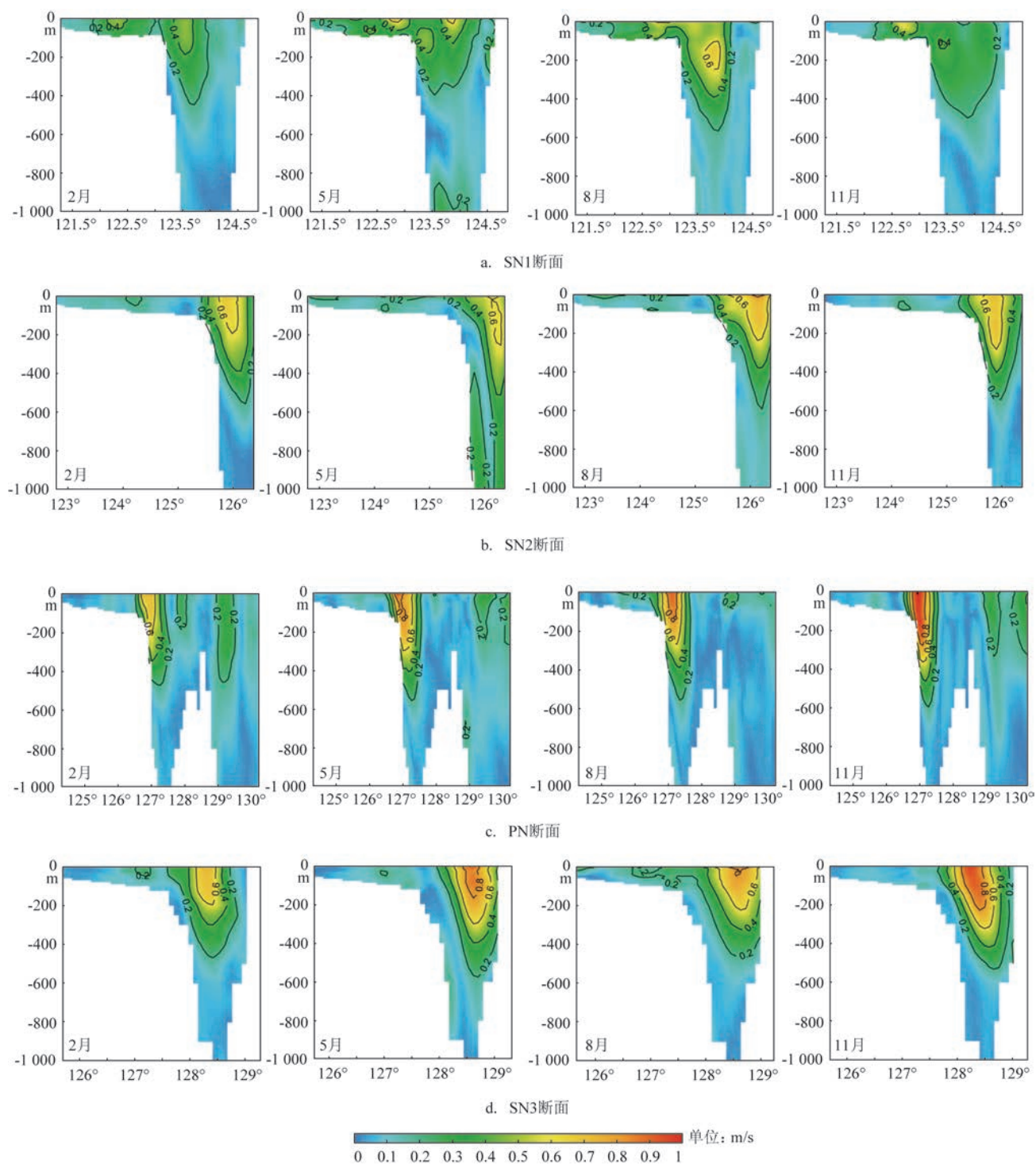


图8 HYCOM在四个断面的流速

Fig.8 Flow velocity of HYCOM at four sections

的区域,冬季和春季的温度锋面几乎从海表到海底一直存在;夏季表层温度锋消失,底层存在;秋季仅在黑潮附近区域从表层到底层存在。温度锋

最显著的区域是东海陆架和黑潮交汇处,即水深150~800 m的区域,不同季节影响深度不一致。冬季影响深度较浅,约600 m,春季和秋季温度锋影响深

度约700 m,夏季可达到800 m;秋季在底层的温度锋最强。温度锋强度为 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的到达深度,在冬季、秋季和春季均在600 m左右,夏季约在800 m。

PN断面的黑潮主轴位置和流速大小的季节性变化特征没有SN2断面那么明显,黑潮流幅比较窄,但流轴的流速大,约为 0.8 m/s (见图8)。流速为 0.2 m/s 的黑潮水可到达深度在春季、夏季和秋季均为600 m左右,冬季则不到500 m。温度锋的位置相对固定,冬季和春季从表层到底层均具有较强的温度锋;夏季表层温度锋面消失,底层70~800 m之间有较强的温度锋存在;秋季表层温度锋不明显。温度锋最强的区域在东海陆架和黑潮交汇处水深150~800 m的区域。温度锋强度为 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的到达深度在600~800 m之间。

SN3断面横切黑潮及其北上的分支,从流速剖面可以看出黑潮主轴的位置,冬季、春季和夏季在 $127^{\circ}\sim 127.5^{\circ}\text{E}$ 有较弱的支流(见图8);黑潮流幅在夏季比较宽,春季、秋季和冬季比较窄,流速为 0.2 m/s 的黑潮水可到达深度在500~600 m之间。温度锋面在冬季有两个高值区域,一个在 $127^{\circ}\sim 127.5^{\circ}\text{E}$ 的陆架浅水区域,另一个在 $128^{\circ}\sim 129^{\circ}\text{E}$ 水深200~800 m的区域。和其他断面类似,在200 m以浅的陆架浅水区域,冬季、春季和秋季的温度锋从海表到底层一直存在,夏季仅在底层存在;温度锋最强的区域在东海陆架和黑潮交汇处水深150~800 m的区域,秋季最强。温度锋强度为 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的到达深度在600~800 m之间。

4 讨论

东海黑潮锋面直接由黑潮水和东海陆架水相交汇而成,因此黑潮的流量和路径是影响锋面强度和位置的重要因素^[25]。James等^[26]认为影响锋面稳定性的主要因子是地形、主轴位置和流量。当黑潮流量增大,黑潮入侵强,锋面强度变大,锋面位置靠近东海陆架;反之,锋面强度随黑潮流量的减小而减弱,锋区位置也更靠外海^[7]。从本文的分析结果来看,在200 m以浅的陆架区域,锋面的位置和强度主要受黑潮的主轴位置和流速大小影响,和前人结论比较一致。在水深大于200 m的深水区,锋面的位置和强度除了和黑潮路径及流量有关外,还和黑潮流幅的宽度有一定关系。黑潮流幅较窄,温度

锋会向陆坡处挤压,外形特征窄且深,可影响至水深1 000 m处;黑潮流幅较宽,则温度锋会向外海伸展,外形特征宽且浅,影响水深约在600 m。温度锋最强的区域在400~600 m,该区域的黑潮流速大约在 $0.2\sim 0.4\text{ m/s}$,流速较慢有助于温度锋的形成。

黑潮次表层水涌升也是影响黑潮锋位置的重要因素^[25]。台湾北部是黑潮锋面变化剧烈的区域,该区域的海洋锋是由100 m处的黑潮水受地形影响上升至表层,与东海海水对峙而形成的^[27]。本文分析结果表明,台湾北部及东北部区域温度锋较强且几乎常年存在,可能原因是次表层黑潮水受地形影响抬升,导致该区域甚至在夏季也有温度锋存在。地形也是影响锋面的重要因素,汤毓祥^[5]认为东海黑潮南中北3段所处的不同地形效应可能是导致锋区域性差异的主导因素。罗义勇等^[28]认为东海陆架多变的地形对黑潮锋面的弯曲起着稳定的作用。此外,季风和海面冷却也在东海黑潮南中北3段锋面的区域性差异中起重要作用^[7]。东海黑潮南段锋面季节性变化大可能是由大风降温混合导致陆架水密度大于黑潮水导致^[29]。本文主要基于资料观测分析了东海黑潮温度锋三维结构的季节性变化特征,在后续的研究中,将通过诊断分析和数值试验等方式对黑潮锋的影响机理作进一步探讨。

5 主要结论

文章基于高分辨率卫星遥感数据、三维温度再分析数据及数值模拟结果,对东海黑潮温度锋的三维结构特征进行分析。结论如下:

(1)东海黑潮海表温度锋在冬季和春季比较强盛,秋季较弱,夏季几乎消失;锋强最大值主要出现在台湾岛北部及东北部以及黑潮中段济州岛以南海域;多年平均的温度锋中心线大致与黑潮主轴平行,在黑潮中段济州岛以南区域有北上的分支。

(2)东海黑潮锋具有显著的三维结构特征,在200 m以浅区域,冬季和春季的温度锋可以从海表直到海底,夏季和秋季的温度锋主要出现在底层;东海黑潮在100~700 m的陆架区域长年存在显著的温度锋。

(3)东海黑潮温度锋区的位置和范围大小与黑潮的路径和流量有关,锋区强度则取决黑潮流与陆架水的温度差异。在水深小于200 m的浅海区域,

锋强较大的区域出现在流轴左侧靠近陆地区域,在200~800 m的陆坡区域,锋强较大的区域在黑潮流轴的左下方。

(4)在黑潮的不同分段,黑潮流幅的宽度和影响深度不同,南段和北段流幅的宽度比中段宽,但大于0.2 m/s的黑潮流速可到达深度相差不大,都在400~600 m之间,黑潮温度锋的影响深度一般比黑潮深度深200 m左右。不同季节各断面温度锋的影响深度有所差别,最深可以影响到水深1 000 m。

参考文献:

- [1] 刘宝银. 利用诺阿卫星红外信息对东海黑潮表层温度锋的解译[J]. 山东海洋学院学报, 1982, 12(3): 11-20.
- Liu B Y. The interpretation on the surface temperature fronts of Kuroshio in the East China Sea using NOAA IR data[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1982, 12(3): 11-20.
- [2] 林传兰. 东海黑潮锋的海洋学特征及其与渔场的关系[J]. 海洋学研究, 1986(2): 12-20.
- Lin C L. Oceanographic characteristics of the Kuroshio Front in the East China Sea and the relationship with fisheries[J]. Donghai Marine Science, 1986, 4(2): 8-16.
- [3] 刘敬武. 东海黑潮区海洋锋的区域气候学效应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- Liu J W. The regional climate effect of SST front in the vicinity of the Kuroshio in East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [4] 张然, 徐海明, 张百超. 东中国海黑潮海洋锋的季节变化特征及其成因[J]. 气象科学, 2016, 36(2): 203-211.
- Zhang R, Xu H M, Zhang B C. Seasonal variation of the SST front in the East China Sea and its causes[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(2): 203-211.
- [5] 汤毓祥. 初论东海黑潮锋的区域性差异[J]. 黄渤海海洋, 1992, 10(3): 1-9.
- Tang Y X. On regional difference of the Kuroshio front in the East China Sea[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1992, 10(3): 1-9.
- [6] 郭炳火, 万邦君, 汤毓祥. 东海海洋锋的波动及演变特征[J]. 黄渤海海洋, 1995, 13(2): 1-10.
- Guo B H, Wan B J, Tang Y X. Wavelike features and evolution of the Oceanic Fronts in the East China Sea[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1995, 13(2): 1-10.
- [7] 贾英来, 刘秦玉, 刘伟, 等. 台湾以东黑潮流量的年际变化特征[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(6): 507-512.
- Jia Y L, Liu Q Y, Liu W, et al. The interannual variation of the Kuroshio transport East of Taiwan[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2004, 35(6): 507-512.
- [8] 刘传玉. 中国东部近海温度锋面的分布特征和变化规律[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2009.
- Liu C Y. Distribution and variations of the thermal fronts in the eastern China Seas[D]. Qingdao: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2009.
- [9] 汤毓祥, 郑义芳. 关于黄、东海海洋锋的研究[J]. 海洋通报, 1990, 9(5): 89-96.
- Tang Y X, Zheng Y F. Research on fronts in East China Sea[J]. Marine Science Bulletin, 1990, 9(5): 89-96.
- [10] Shibata A. Meander of the Kuroshio along the edge of the continental shelf in the East China Sea[J]. Umi to Sora, 1983, 58(4): 113-120.
- [11] Sugimoto T, Kimura S, Miyaji K. Meander of the Kuroshio front and current variability in the East China Sea[J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 1988, 44(3): 125-135.
- [12] Qiu B, Toda T, Imasato N. On Kuroshio front fluctuations in the East China Sea using satellite and in situ observational data[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1990, 95(C10): 18191-18204.
- [13] 任诗鹤, 王辉, 刘娜. 中国近海海洋锋和锋面预报研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(5): 552-563.
- Ren S H, Wang H, Liu N. Review of ocean front in Chinese marginal seas and frontal forecasting[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(5): 552-563.
- [14] 郑全安, 袁业立. 切变波动力学研究 I. 尺度分析与频散关系[J]. 海洋学报, 1988, 10(6): 659-665.
- Zheng Q A, Yuan Y L. Study on shear wave dynamics I. Scale analysis and dispersion relationship[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1988, 10(6): 659-665.
- [15] 李立, 苏纪兰, 许建平. 南海的黑潮分离流环[J]. 热带海洋学报, 1997, 16(2): 42-57.
- Li L, Su J L, Xu J P. Detached Kuroshio rings in the South China Sea[J]. Tropic Oceanology, 1997, 16(2): 42-57.
- [16] 郭炳火, 葛人峰. 东海黑潮锋面涡旋在陆架水与黑潮水交换中的作用[J]. 海洋学报, 1997, 19(6): 1-11.
- Guo B H, Ge R F. The role of the East China Sea Kuroshio front vortex in the exchange between shelf water and Kuroshio water[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1997, 19(6): 1-11.
- [17] 袁耀初, 苏纪兰. 1995年以来我国对黑潮及琉球海流的研究[J]. 科学通报, 2000, 45(22): 2353-2356.
- Yuan Y C, Su J L. Research on Kuroshio and Ryukyu Current in my country since 1995[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(22): 2353-2356.
- [18] 陈春涛, 刘佳佳. 东海北部黑潮锋面涡的快速生成和消散[J]. 遥感信息, 2010(3): 103-107, 128.
- Chen C T, Liu J J. The generation and evanescence of frontal eddy in the East China Sea[J]. Remote Sensing Information, 2010(3): 103-107, 128.
- [19] 贾永君. 东海黑潮锋面不稳定过程遥感与数值模拟研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010.
- Jia Y J. Remote sensing and numerical simulation of the Kuroshio frontal instability process in the East China Sea[D]. Qingdao:

- Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2010.
- [20] 李威, 王琦, 马继瑞, 等. 台湾以东黑潮锋的中尺度过程研究[J]. 海洋通报, 2011, 30(5): 518-528.
- Li W, Wang Q, Ma J R, et al. Study on the meso-scale process of the Kuroshio front to the east of Taiwan[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(5): 518-528.
- [21] Donlon C J, Martin M, Stark J, et al. The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 116: 140-158.
- [22] Locarnini R A, Mishonov A V, Antonov J I, et al. World ocean atlas 2013, volume 1: temperature[R]. NOAA Atlas NESDIS 73. Silver Spring: NOAA, 2013: 40.
- [23] 党振中, 周立佳, 刘建斌, 等. 基于 WOA13 数据的东海黑潮主轴温度锋特征分析[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(4): 26-30.
- Dang Z Z, Zhou L J, Liu J B, et al. Analysis on the characteristics of the Kuroshio temperature front in the East China Sea based on WOA13 data[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(4): 26-30.
- [24] 刘鹏, 张永刚, 刘建斌. 基于 WOA13 数据的赤道大西洋海区温度锋的时空分布特征分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(5): 47-57.
- Liu P, Zhang Y G, Liu J B. Temporal and spatial distribution characteristics of temperature front in the equatorial Atlantic based on WOA13 data[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(5): 47-57.
- [25] 于洪华, 苗育田. 东海黑潮锋的特征分析. 黑潮调查研究论文选(三)[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
- Yu H H, Miao Y T. Characteristic analysis of the Kuroshio front in the East China Sea. Selected papers on the Kuroshio survey (3) [M]. Beijing: Ocean Press, 1991.
- [26] James C, Wimbush M, Ichikawa H. Kuroshio meanders in the East China Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 1999, 29(2): 259-272.
- [27] Liu Choteng and Pai Suchuan. As Kuroshio turns: (II) the oceanic front North of Taiwan[J]. 1987, 18: 49-61.
- [28] 罗义勇, 吴德星, 林霄沛. 地形对东海黑潮锋面弯曲影响研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(3): 305-312.
- Luo Y Y, Wu D X, Lin X P. Effects of topography on Kuroshio frontal meanders in the East China Sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31(3): 305-312.
- [29] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 1-16.
- Su J L. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(4): 1-16.

Three-dimensional structure characteristics of Kuroshio thermal front in the East China Sea

WANG Xingyu, JI Qiyan, PENG Tengting, LIN Xiayan, JIA Xiaoyan, HAN Lei

(Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022 China)

Abstract: Based on satellite remote sensing sea surface temperature data, three-dimensional reanalysis temperature data and numerical simulation results, the three-dimensional structure characteristics of Kuroshio thermal front in the East China Sea are studied in this paper. The Kuroshio thermal front at the sea surface in winter and spring are stronger than that in autumn and disappears in summer. The annual mean SST front zones mainly located in the area of water depth of 70~700 m. The core line of the thermal front is roughly parallel to the current axis of the Kuroshio with a northward branch in the middle region of the Kuroshio to the south of Jeju Island. The Kuroshio thermal front in the East China Sea is affected by the Taiwan Warm Current, the Kuroshio and its branches. It always exists from the surface to the bottom in winter and spring where the water is shallower than 200 m, while it mainly appears below 50 m in summer and autumn. The Kuroshio and the shelf water in the East China Sea can also form significant thermal front, which is located at the bottom-left side of the Kuroshio on the shelf area with a depth of 100~700 m. The intensity of the thermal front in this area is larger than that of the sea surface thermal front at the same location. Affected by the path, current amplitude, depth and velocity of the Kuroshio, the impact depth of Kuroshio thermal front in the East China Sea reveals both regional and seasonal differences. The front is generally 200 m deeper than the arrival depth of the Kuroshio's velocity of 0.2 m/s, and can even reach the depth of about 1 000 m.

Key words: the East China Sea, Kuroshio, thermal front, three-dimensional characteristics