

谭可易, 谢玲玲, 李明明, 等. 粤西陆架温度锋三维结构与季节变化机制分析[J]. 海洋学报, 2023, 45(10): 42–55, doi:10.12284/hyxb2023053  
Tan Keyi, Xie Lingling, Li Mingming, et al. 3D structure and seasonal variation of temperature fronts in the shelf sea west of Guangdong[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(10): 42–55, doi:10.12284/hyxb2023053

# 粤西陆架温度锋三维结构与季节变化机制分析

谭可易<sup>1,2</sup>, 谢玲玲<sup>1,2,3</sup>, 李明明<sup>1,2,3\*</sup>, 李敏<sup>1,2,3</sup>, 李君益<sup>1,2,3</sup>

(1. 广东海洋大学 海洋与气象学院 近海海洋变化与灾害预警实验室, 广东 湛江 524088; 2. 陆架及深远海气候资源与环境广东省高等学校重点实验室, 广东 湛江 524088; 3. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 基于 2018–2019 年现场高分辨率温度观测和 1993–2021 年的 CMEMS 再分析海表温度 (SST) 和风场数据, 分析粤西陆架海温盐锋的三维结构、季节变化和影响机制。多年 SST 数据显示, 海表温度锋冬季最强、出现概率和覆盖宽度最大, 量值分别为 0.049°C/km、75% 和 66 km。春季和夏季次之, 而秋季则几乎完全消失。冬季锋面平均离岸 50 km, 夏季则向岸靠近为 23.1 km。2018 年春季、夏季和 2019 年夏季的现场观测进一步给出锋面在次表层的三维结构, 结果显示春、夏季 20 m 等深线以浅处均有锋面存在, 该锋面是沿岸高温海水与离岸低温海水辐聚而成, 随着深度的增加锋面强度减小, 覆盖范围向岸收缩。20 m 以深水域锋面在次表层中强于表层, 随深度增加而增强并向岸偏移。相关性和信息流分析发现, 海表面风应力旋度和沿岸风是影响粤西陆架海表温度锋面的重要因素。该温度锋存在年际变化, PDO 负位相时的 La Niña 年锋面强度出现极大值, 而 PDO 正位相时的 El Niño 年则对应极小值。

**关键词:** 海洋锋; 季节分布; 三维结构; 信息流; 粤西陆架

中图分类号: P731

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)10-0042-14

## 1 引言

海洋锋作为海洋环境参数的跃变带, 不同水团之间发生强烈交换<sup>[1-3]</sup>。同时, 锋面海域通常还存在强烈的垂直运动, 在海洋动力学研究中十分重要<sup>[4-5]</sup>。海洋锋区内海水稳定度小, 海面附近的海-气交换异常活跃<sup>[6-7]</sup>, 是海-气之间热量、氧气和温室气体等物质交换以及海洋表层与更深层间相互输送的关键通道<sup>[8]</sup>。随着强烈的辐聚平流和垂直运动, 锋区内营养盐等物质富集, 生物生产力增高<sup>[9-10]</sup>, 提升浮游植物生物量<sup>[11-12]</sup>, 与渔业生产息息相关。同时, 锋面辐合带也汇聚着浮油、碎屑、重金属等污染物, 对海洋环境管理、治理工作有着深远的影响。因此海洋锋过程历来深受海洋学者关注。

南海是位于西太平洋的半封闭边缘海, 受东亚季风强迫和太平洋过程扰动, 南海三维环流和水团结构复杂<sup>[13-16]</sup>, 拥有广阔陆架的南海西北部海域海洋锋面过程也十分活跃<sup>[17-19]</sup>, 对当地的生态发展和动力过程有着深远的影响<sup>[20]</sup>。许多学者通过卫星遥感手段对南海表层温度锋进行分析, Wang 等<sup>[21]</sup>使用 NOAA/NASA Pathfinder 卫星观测资料, 发现南海北部海表温度锋面存在很强的季节性特征。陈彪等<sup>[22]</sup>以 GHR 海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 资料为基础, 分析了琼东和粤西海域的海表温度锋, 结果表明南海北部陆架锋除季节性外, 还存在较强的年际变化。此外还有许多学者基于遥感资料对南海不同位置的海表温度锋面进行了系统性的分析<sup>[18, 23-24]</sup>。卫星数据给出了海洋表层锋面特征, 现场观测则能对锋面垂向上的

收稿日期: 2022-09-29; 修订日期: 2022-12-20。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42276019)。

作者简介: 谭可易 (1994—), 女, 广西壮族自治区贵港市人, 博士研究生, 主要从事海洋中小尺度过程研究。E-mail: tkyddd@163.com

\* 通信作者: 李明明 (1984—), 女, 山东省泰安市人, 博士, 讲师, 主要从事海洋混合和近岸动力过程的研究。E-mail: limm@gdou.edu.cn

变化进行分析。Jing 等<sup>[25]</sup>通过现场观测发现,琼东夏季表层温度锋强度比卫星遥感观测更强,而次表层锋面又比表层更强。Zhang 等<sup>[26]</sup>对珠江口卫星遥感数据和现场观测资料结果分析,结果表明该地温度锋在表层是最强的。关于锋面形成机制,风场强迫往往首先被考虑<sup>[21,27]</sup>。夏季西南季风在南海北部陆架诱发上升流和冬季东北季风诱发的下降流,均可形成温度锋<sup>[28-30]</sup>。也有研究表明风应力旋度引起的埃克曼抽吸会在陆架上形成温度锋<sup>[31-32]</sup>。

粤西陆架海位于南海陆架西北部,属于东亚季风区,受冬季东北、夏季东南这两个方向不同季风强迫作用。不同于琼东和粤东海域,粤西陆架沿岸常年存在西南向流<sup>[32]</sup>。在海面风场和近岸环流影响下,粤西海域也存在明显的海表温度锋<sup>[24]</sup>。目前,有关南海北部陆架锋面的现场观测研究大都集中在琼东和粤东海域<sup>[33-34]</sup>,粤西陆架区锋面三维特征认识较少。此外,近年来研究显示,海面风应力与锋面导致的 SST 异常息息相关<sup>[35-39]</sup>,但粤西温度锋和风场之间的因果关系有待进一步探究。

本文将在高分辨率再分析 SST 数据分析粤西陆架海表面温度锋的基础上,结合 2018 年、2019 年春、夏季 3 个航次的现场观测资料,探讨温度锋在表层-次表层上的三维结构及季节变化,同时通过计算信息流<sup>[40-41]</sup>,探究温度锋和风场之间的因果关系。

## 2 数据和方法

### 2.1 数据来源

#### 2.1.1 再分析数据

本文所使用的日平均海表面温度资料为 COPERNICUS MARINE ENVIRONMENT MONITORING SERVICE 所提供的 SST 和水平流场再分析资料,空间分辨率为  $0.083^\circ \times 0.083^\circ$ ,时间跨度为 1993-2021 年,共 29 年,下载地址: [http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=GLOBAL\\_ANALYSIS\\_FORECAST\\_PHY\\_001\\_024](http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024)。所使用风场为欧洲中期数值预报中心(ECWMF)提供的海上 10 m 再分析风场数据,时间分辨率为 6 h,空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,时间跨度为 1993-2021 年,共 29 年,下载地址为 <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>。

#### 2.1.2 现场观测

2018 年 5 月、8 月及 2019 年 8 月,广东海洋大学对南海西北陆架海进行了现场观测调查。其中 2018 年 5 月、8 月包括 A、B、C、D、E 5 个断面,站位分布

如图 1 中所有实心点所示。其中断面 A 有 25 个站位(A1-A25),断面 B 有 22 个站位(B1-B22),断面 C 有 21 个站位(C1-C21),断面 D 有 22 个站位(D1-D22),断面 E 有 20 个站位(E1-E20)。2019 年 8 月为 B(B1-B19)、C(C2-C19)、D(D2-D19) 3 个断面,站位为黑色实心点位置。站位按照跨陆架方向离岸距离由小到大依次排序,断面大致垂直于等深线,与岸线夹角约为  $45^\circ$ ,断面之间平均间隔为 20 km,断面上站位之间的平均间隔为 5 km。

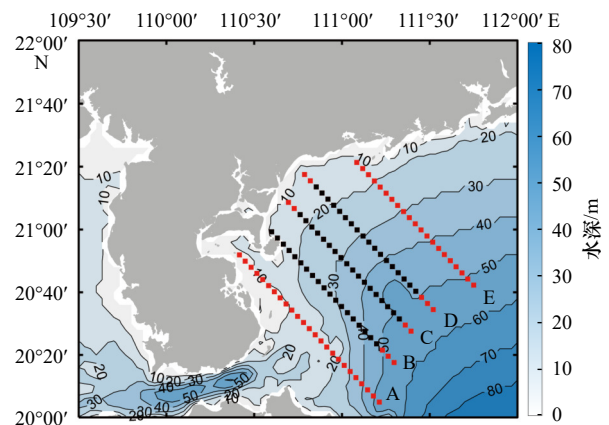


图 1 粤西陆架地形及 2018 和 2019 年观测站位分布  
Fig. 1 Bathymetry and observation stations on the shelf west of Guangdong in 2018 and 2019

所有实心点为 2018 年观测站位,黑色实心点为 2019 年观测站位  
(红色点在 2019 年未观测)  
All dots represent stations of which all are in 2018 and the black ones are in 2019 (the red dots were not observed in 2019)

现场观测所使用仪器为美国 SeaBird 海洋仪器公司出产的 SBE 19 plus 温盐深仪(CTD),用以获取温度数据,采样频率为 4 Hz,每个站点进行两次测量,所得数据由仪器自带标定文件进行标定,并进行了质量控制。5 月、8 月分别代表该海域的春季和夏季。在下文的计算锋面强度过程中,所获得的温盐数据将插值为  $62 \times 67 \times 55$  的正交矩阵,其中  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (3.5 \text{ km}, 3.5 \text{ km}, 1 \text{ m})$ 。

### 2.2 锋面参数计算

根据 CMEMS SST 再分析日资料,分别计算  $x$  方向和  $y$  方向上的 SST 梯度分量,再将其合成得到各个点上的 SST 梯度大小,记为锋面强度  $GM$ :

$$GM = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (1)$$

以  $0.03 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$  为海表锋面强度阈值<sup>[25]</sup>,如果该点锋面强度大于该阈值,则将该点计为锋面出现点,按照式(2)计算 1993-2021 年共 29 年每一天温度锋面出现的概率  $P$ :

$$P = \frac{n}{N}, \quad (2)$$

式中,  $N$  表示所用资料中所包含的所有有效天数;  $n$  表示为锋面出现的次数。概率大于 40% 的认为是温度锋面出现区域。

为了更加直观地描述锋面特性随时间的变化, 本文采用锋面指数  $I$ 、锋面覆盖宽度  $W$  和离岸距离  $L$  来叙述南海西北陆架海锋面的变化特征。其中, 锋面指数定义为锋面强度与出现概率的乘积, 即  $I = GM \cdot P$ ; 锋面覆盖宽度  $W$  为锋面跨陆架方向上的平均宽度, 离岸距离  $L$  为锋面中心线与海岸线之间的平均距离。

### 2.3 信息流

Liang<sup>[40-41]</sup> 提出的信息流可以很好地计算两个变量之间的因果关系, 信息流是以一个序列到另一个序列的信息时间速率来衡量两者之间的因果关系, 不仅可以说明因果关系的大小, 还能够体现因果关系的方向, 及何为因、何为果。因此, 可以将其用于锋面参数变化的动力机制研究中。两个样本序列间的信息流计算如下:

$$T_{2 \rightarrow 1} = \frac{C_{11}C_{12}C_{2,d1} - C_{12}^2C_{1,d1}}{C_{11}^2C_{22} - C_{11}C_{12}^2}, \quad (3)$$

式中,  $C_{ij}$  和  $C_{i,dj}$  分别为  $X_i$  与  $X_j$  之间的样本协方差和  $X_i$  与  $X_j = [(X_{i,n+1} - X_{i,n})/\Delta t]$  之间的样本协方差, 以上公

式计算可得到  $X_2$  序列到  $X_1$  序列的信息流, 若要计算反方向的信息流  $T_{1 \rightarrow 2}$ , 直接变换下标 1 和 2 即可得到。

## 3 结果

### 3.1 海表温度锋季节分布

图 2 为再分析数据计算得到的粤西陆架海表面温度锋面强度  $GM$  季节分布。可以看到冬季锋面覆盖范围最广, 占据了粤西海域 20~50 m 水深的海域, 在陆架上连成一片, 且锋面内的平均锋面强度值最大、宽度最宽、离岸最远, 分别达 0.049°C/km、66.7 km、50 km。而到了春季, 锋面平均宽度大幅变窄至 28 km, 沿岸锋面主要出现在 10 m 等深线附近, 平均离岸距离为 28.2 km, 且锋面强度减弱至 0.038°C/km, 外海处的锋面主要出现在海南岛西北侧 50~70 m 等深线之间。夏季, 10~20 m 等深线之间的沿岸锋面平均强度增强至 0.043°C/km, 宽度和离岸距离分别增大为 38.7 km 和 23.1 km, 且未在陆架上形成连续的锋面, 而 50~70 m 等深线之间的锋面相较于春季则变化不大。秋季粤西陆架西北侧的锋面逐渐发展, 强度为 0.035°C/km, 其位置与冬季 20~30 m 等深线处锋面强度大值区位置相同, 而西南侧海南岛附近的锋面则消失。

图 3 为锋面出现概率  $P$  季节分布。如图所示, 锋面出现概率与锋面强度分布相似, 同样是冬季出现概

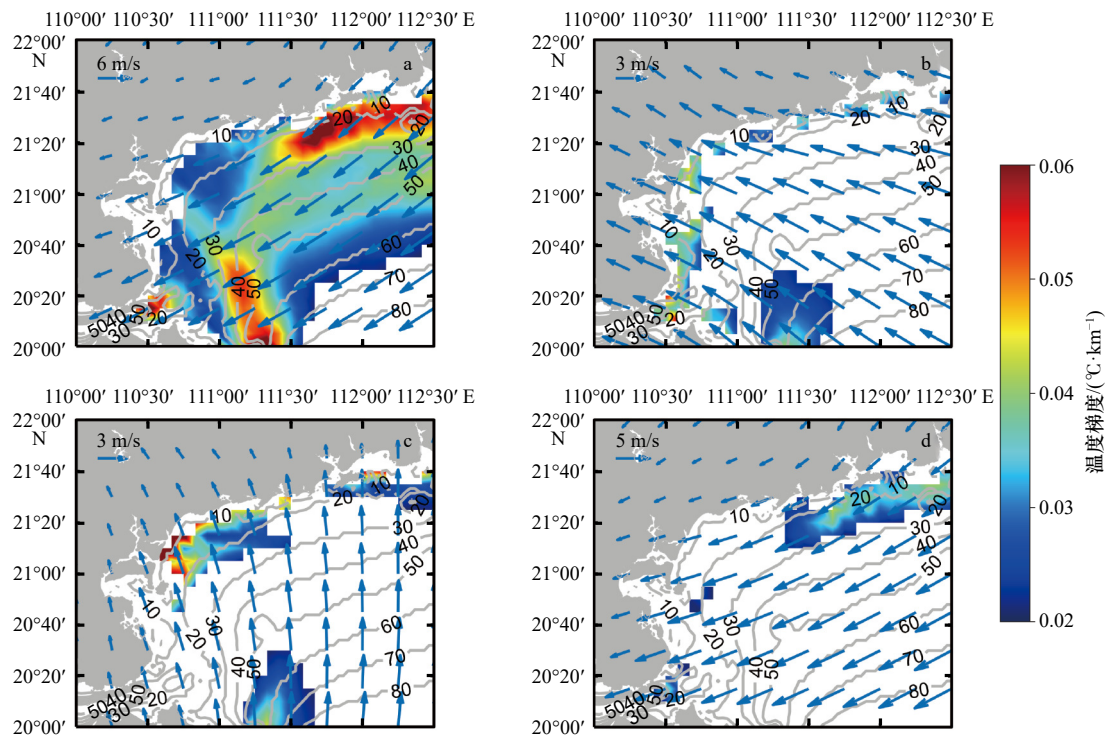


图 2 海表面温度梯度的季节分布

Fig. 2 Seasonal distribution of sea surface temperature gradient

a. 冬天; b. 春天; c. 夏天; d. 秋天。灰色等值线为水深, 蓝色箭头为海面 10 m 风矢量

a. Winter; b. spring; c. summer; d. autumn. Gray isolines represent the under depth and blue arrows represent the wind vectors of 10 m on the sea surface

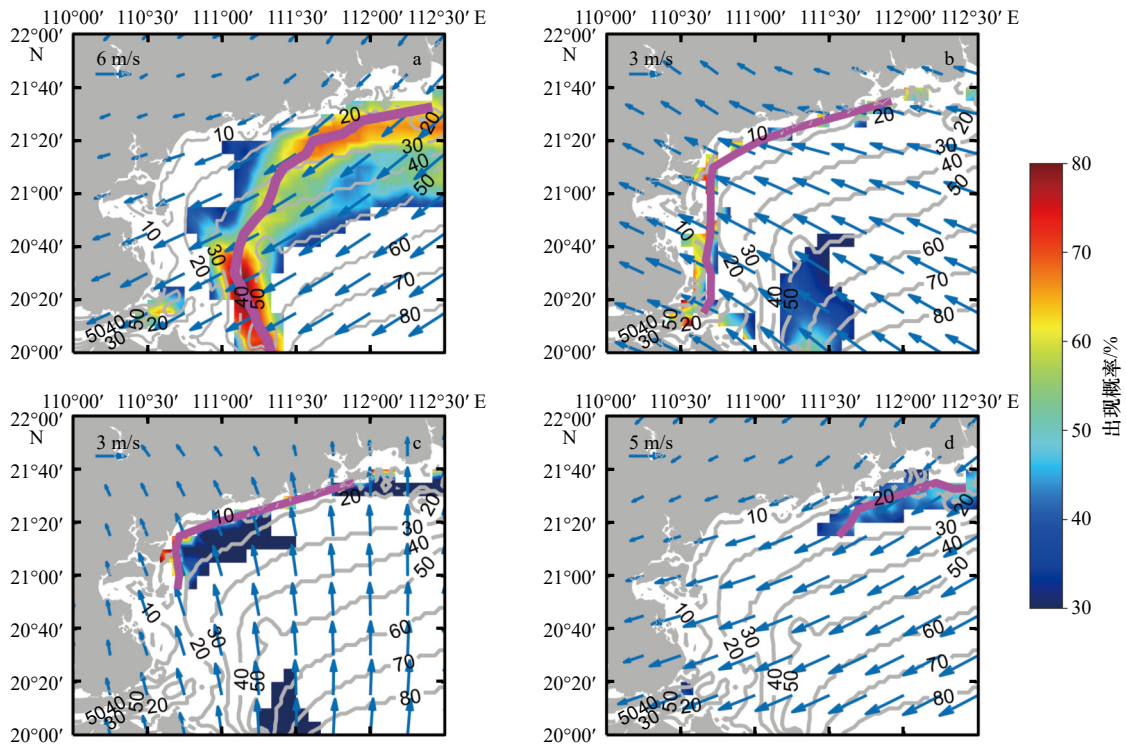


图3 锋面出现概率的季节分布

Fig. 3 Seasonal distribution of mean occurrence probabilities of the front at the sea surface

a. 冬天; b. 春天; c. 夏天; d. 秋天。灰色等值线为水深, 蓝色箭头为海面10 m风矢量, 洋红色实线为锋面中心线

a. Winter; b. spring; c. summer; d. autumn. Gray isolines represent the under depth and blue arrows represent the wind vectors of 10 m on the sea surface. The solid magenta line is the centerline of the front

率最大, 在75%以上, 并随春季气温升高风速减小, 锋面逐渐大幅向岸缩进, 出现概率也逐渐减小至60%。夏季锋面强度虽大于春季, 但从出现概率上看, 则与春季相当且可能出现锋面的面积小于春季, 尤其是海南岛附近。直至秋季, 除了20 m等深线附近平均出现概率为52%的区域以外, 陆架其余地方锋面几乎消失。

图4进一步表示出锋面指数 $I$ 的季节分布。 $I$ 的分布特征与 $GM$ 和 $P$ 相似, 冬季海南岛东北部和粤西靠珠江口沿岸处的锋面强度大且出现概率高,  $I$ 可达3以上。春季粤西沿岸 $I$ 减小至2, 夏季 $I$ 略大于春季, 为2.1, 而秋季最小, 为1。

对海表温度锋面强度 $GM$ 、出现概率 $P$ 、锋面指数 $I$ 、覆盖宽度 $W$ 和离岸距离 $L$ 这5个锋面参量进行月平均。图5a表示5个参量的归一化气候态月平均变化, 归一化值分别为: 锋面强度为 $0.032^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 、出现概率为59%、锋面指数为2.1、覆盖宽度为41.7 km和离岸距离为33.2 km, 可见粤西陆架表层温度锋呈“双峰型”分布, 冬季锋面强度最强、覆盖面积最宽、出现概率最大、指数最强, 为最高峰, 峰值约为秋季最低值的3~4倍; 其次为夏季, 峰值约是秋季最低值的

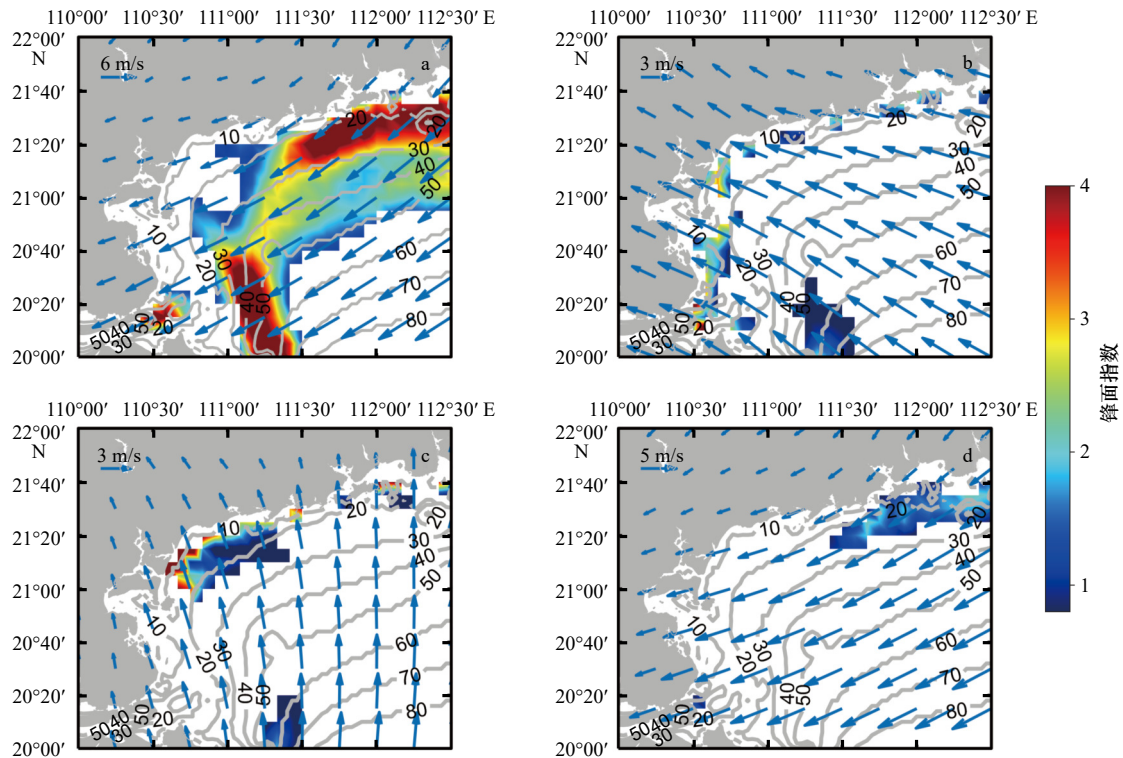
2倍。锋面离岸距离变化最为显著, 冬季为50~80 km, 其他季节约为15~40 km。

为更清楚地揭示海表温度锋时间和空间上的分布特征, 对以上5个锋面特征的29年月平均时间序列进行快速傅里叶变换, 并将频谱归一化。如图5b所示, 可以看到锋面特征存在3个明显的峰值, 对应周期分别为4个月、6个月和12个月, 说明粤西海表温度锋存在明显的季节和季节内变化。此外, 21个月位置还出现一个低峰, 说明锋面存在一定年际变化。进一步对锋面强度进行二维空间傅里叶变化, 并对每个波数的能量密度进行时间平均, 得到图5c所示的波数谱, 其峰值对应空间尺度约为37 km。粤西陆架处正压罗斯贝变形半径约为200 km、斜压罗斯贝变形半径为20~30 km, 温度锋略大于斜压罗斯贝半径之间, 意味着再分析数据得到的海表温度锋主要是满足地转平衡的中尺度锋。

### 3.2 基于现场观测的温度锋面三维结构

#### 3.2.1 温度场分布特征

图6为3次观测期间海表温度和海表面风场分布。可见, 2018年春夏两次航次的表面风场都属偏南风, 春季航次(图6a)风矢量在靠陆位置向东偏

图4 锋面指数  $I$  的季节分布Fig. 4 Seasonal distribution of front index  $I$  at the sea surface

a. 冬天; b. 春天; c. 夏天; d. 秋天。灰色等值线为水深, 蓝色箭头为海面 10 m 风矢量, 洋红色实线为锋面中心线  
a. Winter; b. spring; c. summer; d. autumn. Gray isolines represent the under depth and blue arrows represent the surface wind vectors of 10 m on the sea surface. The solid magenta line is the centerline of the front

转, 与岸线平行, 而夏季(图 6b)则维持向北的方向, 整体风速是 3 次观测中最大的, 约为 5 m/s, 次年 2019 年夏季(图 6c)海表面风场整体为西南风。2018 年春季和 2019 年夏季观测期间的 SST 均呈现西高东低、北高南低的分布特征, 而 2018 年夏季出现东北、西南两侧分别暖冷对称分布。3 次观测期间 SST 有一共同点: 西南侧有冷水入侵, 这与海南岛东北侧的琼东北上升流有关<sup>[42]</sup>。在西南季风影响下, 南海北部陆架区普遍存在上升流, 同时海流与地形作用也会诱发上升流, 使得冷水从海南岛东侧底层涌升至海表, 并在风场驱动下向东北方向流动, 使粤西陆架海 SST 出现北高南低的分布特征。

图 7 为现场观测得到的次表层 2 m、8 m 和 12 m 的温度分布。在 2 m 处, 2018 年春季观测(图 7a, 图 7d)中, 20 m 以浅的近岸温度偏高, 平均温度为 30.25°C, 外侧陆架海降为 28.76°C。西南端有低温水向陆架内部入侵, 几乎在 30 m 等深线处将原有的陆架水一分为二, 这一结果与图 6 中由 CMEMS 再分析资料得到的观测期间 SST 分布相对应。而同年夏季(图 7b, 图 7e)整体温度低于春季, 约 10 m 以浅的沿岸平均温度为 28.86°C, 与水深更深的区域相比, 温度高 1.87°C,

在西北侧 20 m 等深线附近存在冷水中心。与春季相似, 最南端出现了低温水向岸线入侵, 且入侵范围更广, 几乎延伸到 10 m 等深线。2019 年的夏季航次(图 7c, 图 7f)在西南端也同样存在冷水入侵现象, 但入侵程度弱于 2018 年夏季, 仅至 20 m 等深线外侧, 其与向岸一侧海水温差为 1.25°C。

在 8 m 水深, 2018 年春季最南端的冷水入侵相比表层更向岸线推移, 冷暖水的分界线也从 30 m 等深线向前推至 20 m 和 30 m 等深线之间。对比下层的温度平面分布可知, 较暖的海水几乎都限制在 15 m 水深以上。同年夏季(图 7e)则为中间低四周高的特点, 中部的冷水更显强势, 几乎占据整个平面, 中部平均温度为 26.40°C, 与四周平均温度差为 2.21°C。次年夏季观测面中部则呈相反分布, 呈现中心暖四周冷的特征, 中部平均温度为 29.91°C, 较四周高 3.17°C。而在 12 m 水深层中, 2018 年春季东北部偏暖, 夏季偏暖位置为东部及 50 m 等深线以深区域, 次年夏天则出现在中部 20~30 m 水深之间, 冷暖温差都在 2°C 左右。

### 3.2.2 温度锋面分布特征

图 8 为不同深度的温度梯度分布。与海表温度

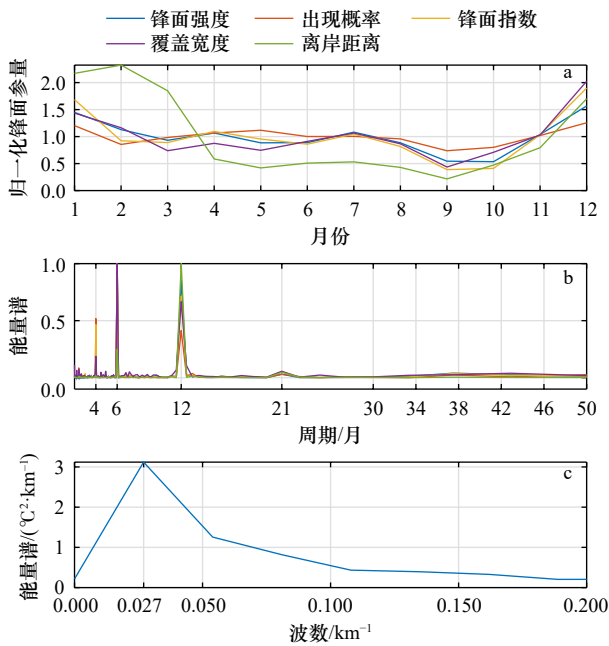


图5 归一化后的5个锋面参量的月平均分布(a)、锋面参量的归一化FFT频率谱(b)和时间平均后锋面强度的FFT空间波数谱(c)

Fig. 5 Normalized monthly average distribution of the five frontal covariates (a), normalized FFT frequency spectrum of frontal covariates (b), omnidirectional time-average FFT spectra of frontal intensity (c)

锋面强度(图2)相比,现场观测得到的次表层锋面强度普遍较高,最大锋面强度达到 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,为表层锋面最大强度的5倍。若以上文海表温度锋相同的 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 为阈值,则锋面几乎覆盖全部观测区域。这里我们以观测区平均温度梯度 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 为次表层锋面阈值确定锋面。由图可见,2018年春季2 m水层(图8a),锋面在30 m等深线附近出现,平均梯度约为 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。在跨陆架方向上看,主要集中在20~40 m等深线之间,锋面宽度约为30 km。同年夏季(图8b),

与春季不同的是,2 m深度上,锋面出现位置更偏向近岸,在西北侧冷水中心周围出现锋面,跨陆架方向上宽度约为10 km,同样沿着等深线分布,宽度小于春季,约为25 km,但其强度大于春季,达 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。次年夏季2 m层未出现温度锋(图8c)。

在8 m处,2018年春季(图8d)于30 m等深线附近的温度锋面相比于表层的锋面明显增强,平均强度增至 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,位置也更向近岸靠拢。同年夏季(图8e)随着水深增加,温度锋呈指状自西南向东北延伸,梯度也增大至 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。次年夏季(图8f)则在10~20 m和30~50 m等深线处出现了近岸和离岸两个温度锋,宽度分别为15 km和35 km,梯度大小分别为 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 和 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。随着水深增加至12 m,2018年春季(图8g)锋面沿20~30 m等深线向北偏移,且覆盖面缩小。夏季也出现相同现象。

除30 m以浅的近岸锋外,50 m以深海域也出现了强度随水深增加而增强的离岸温度锋,2018年春季平均强度由 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 增加至 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,夏季则由 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 变为 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。2019年夏季的离岸锋面沿等深线向东北延伸,且其强度比2018年春季相同位置上的锋面更强,达 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

从垂直方向上看,3次观测中锋面强度均随水深增加而增强,锋面由下向上发展,覆盖宽度为15~35 km,离岸距离为10~80 km。从锋面三维结构上看,说明锋面是由外海自下而上的冷水与近岸暖海水相遇而形成,对应着粤西陆架南侧琼东和东北上升流冷水,而3次观测期间的西南风均有利于该上升流的形成和北向运移。而次表层的温度锋面比表层锋面普遍更强,可能与下层冷水向上抬升的等温线是否“露头”有关。

为了更明确地显示垂向上锋面分布变化特征,以

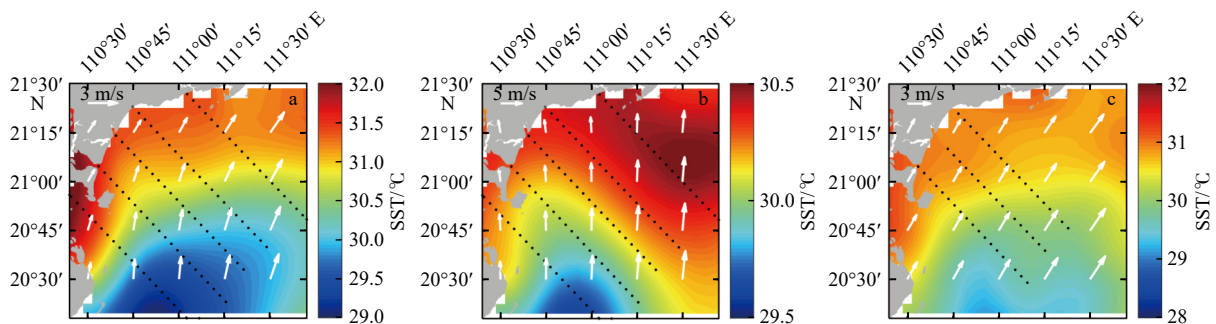


图6 现场观测航次期间平均CMEMS再分析SST和ECWMF再分析风场分布

Fig. 6 Sea surface temperature (SST) from CMEMS reanalysis data and sea surface wind field from ECWMF reanalysis data during the cruise observations

a. 2018年春季; b. 2018年夏季; c. 2019年夏季。黑色实心点为站位,白色箭头为海面风矢量

a. Spring 2018; b. summer 2018; c. summer 2019. The black dots represent stations, and the white arrows represent the surface wind vectors

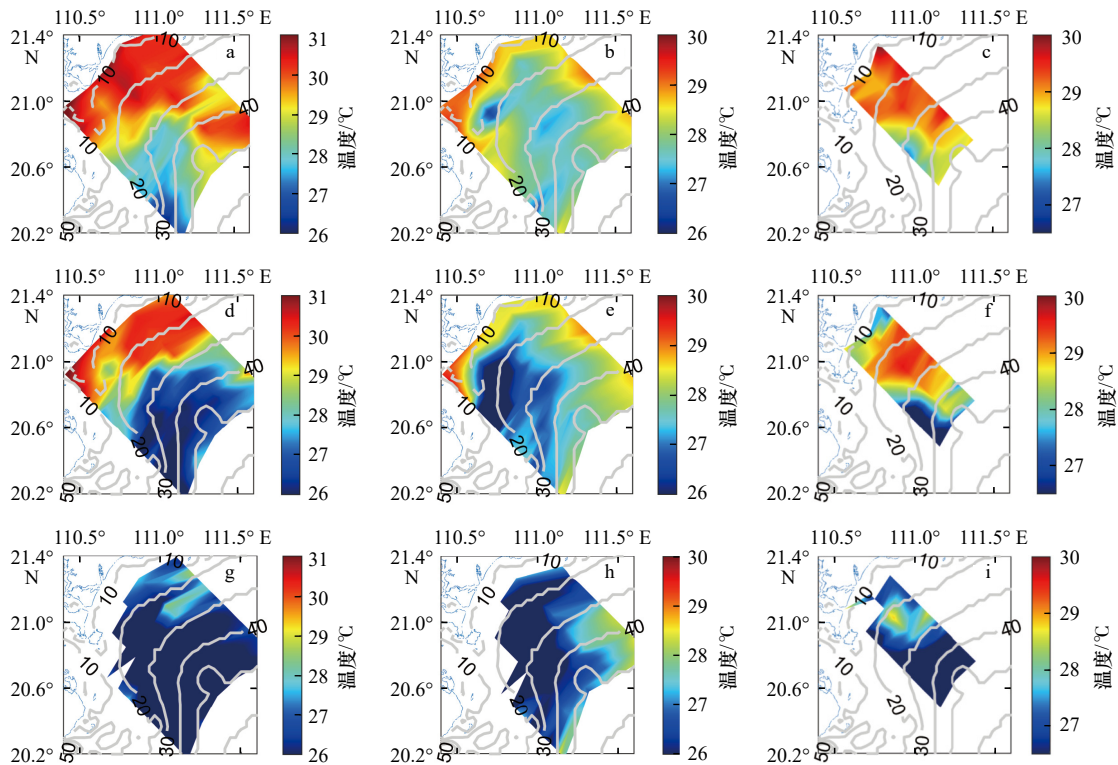


图 7 2018 年春季(a, d, g)、2018 年夏季(b, e, h)和 2019 年夏季(c, f, i)观测温度水平分布

Fig. 7 Horizontal distribution of temperature in spring 2018 (a, d, g), summer 2018 (b, e, h), and summer 2019 (c, f, i)

a-c 为 2 m, d-f 为 8 m, g-i 为 12 m。蓝色实线和灰色实线分别为海岸线和等深线

a-c at 2 m, d-f at 8 m, and g-i at 12 m. The blue and gray solid lines represent the coastline and isobaths, respectively

3 次观测的 C 断面为代表, 给出 C 断面上温盐分布及其温度梯度分布。由图 9 可见, 2018 年春季, 沿岸 60 km 之内 15 m 等深线以浅的上层水体温度分布均匀, 向外海则出现等温线的抬升, 并出现等温线“露头”的现象(对应了图 7a 南部的低温以及图 8a 30 m 等温线附近的不稳定锋面), 同时在离岸距离 60~85 km 之间出现宽度约为 15 km 且强度随深度增强的温度锋面。同年夏季下层冷水沿着地形向上爬升, 温度锋也沿着地形分布, 宽度为 10~15 km。10 m 以浅的温度锋随水深增加逐渐向岸倾斜, 而深层锋面则逐渐向外海偏移。次年夏季近岸等温线呈下凹趋势, 而在离岸 85 km 更远处则为抬升, 其温度锋同样有随深度加深而增强的特征。通过温度锋的垂向分布可以看出, 温度锋主要出现在 10 m 以下深度, 是由近岸上层受太阳辐射增温的暖海水与离岸下层冷海水形成的, 其强度与沿岸海水的升温过程和下层冷水的向岸入侵程度有关。

### 3.3 表层温度锋与风场关系

#### 3.3.1 相关分析

前文分析显示, 粤西陆架温度锋面存在明显的季节变化。结合海面风场和流场分析, 冬季的海表面温

度锋面可能与沿岸流携带低温低盐水和陆坡陆架流携带高温高盐水有关。东北季风将高纬度的冷水通过台湾海峡向广东沿岸输送, 形成低温低盐的沿岸流<sup>[43-45]</sup>; 同时高温高盐的黑潮水体通过吕宋海峡输入南海, 并沿着陆坡和陆架向西流动<sup>[46-48]</sup>, 在东北季风向岸埃克曼输运下, 与低温沿岸流形成温度锋面。而春季季风转换期间风速、沿岸流速减弱, 高纬度冷水入侵减少, 锋面逐渐消失。夏季西南季风有利于在粤西陆架形成海水离岸输运并诱发沿岸上升流, 并形成夏季上升流锋。而秋季风向逐渐转为东北风但风速小于冬季, 因而出现与冬季相似但强度更小的锋面。

图 10a 和图 10b 示出海表锋面强度与海面 10 m 风速的时间序列, 可以看到锋面和风速都存在明显的季节变化, 并且锋面强度的高值(低值)大多对应着风速的高值(低值), 说明粤西陆架海面温度锋的季节变化与风场关系密切<sup>[42]</sup>。海洋表层局地风应力形成的埃克曼抽吸是上升流产生的关键机制<sup>[31]</sup>, 而上升流区的边缘也往往伴随着峰面的出现。图 10c 和图 10d 示出粤西风应力散度、旋度时间序列, 可见其峰值也多对应锋面强度高值, 风应力散度、旋度为正, 有利于锋面的形成, 因此风应力的散度和旋度也是影响

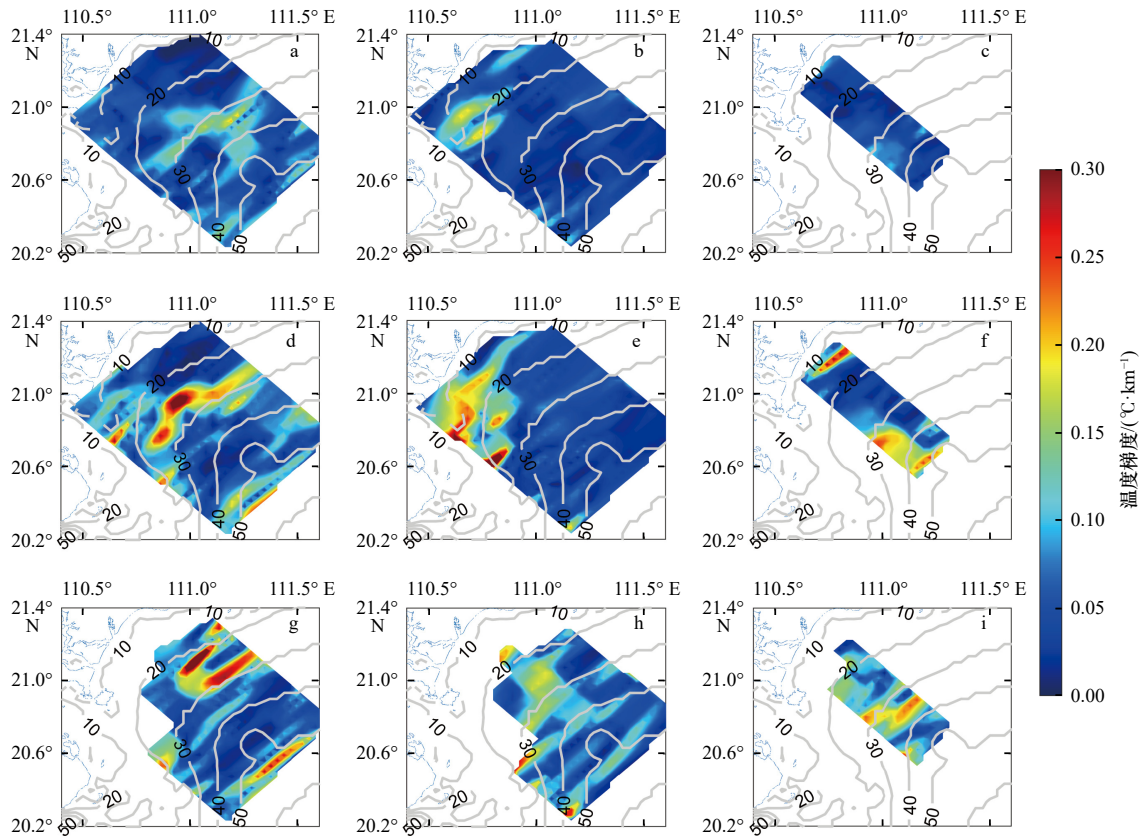


图8 2018年春季(a, d, g)、2018年夏季(b, e, h)和2019年夏季(c, f, i)观测温度水平梯度分布

Fig. 8 Horizontal distribution of temperature gradient in spring 2018 (a, d, g), summer 2018 (b, e, h), and summer 2019 (c, f, i)

a-c 为 2 m, d-f 为 8 m, g-i 为 12 m。蓝色实线和灰色实线分别为海岸线和等深线

a-c at 2 m, d-f at 8 m, and g-i at 12 m. The blue and gray solid lines represent the coastline and isobaths, respectively

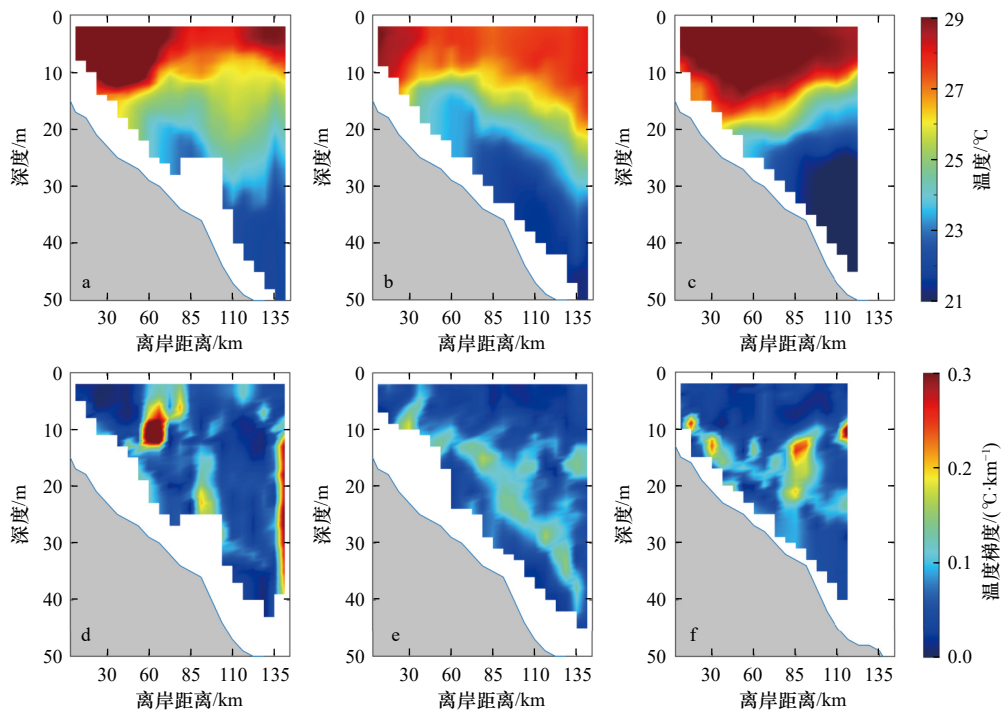


图9 2018年春季(a, d)、夏季(b, e)和2019年夏季(c, f)C断面的温度(a-c), 及温度梯度(d-f)垂直分布

Fig. 9 Vertical distribution of temperature (a-c) and gradient of temperature (d-f) at Section C in spring (a, d), summer 2018 (b, e), and summer 2019 (c, f)

锋面的因素。同样地,沿岸流可带着高纬度海水向南入侵粤西陆架,故也应考虑沿岸流速对锋面的影响(图 10e)。

基于 ECWMF 海面 10 m 风场资料,计算沿岸风、向岸风和风应力散度、旋度,分别与海表锋面强度、出现概率、覆盖宽度和离岸距离 4 个变量的月平均时间序列进行相关性分析。考虑锋面与风速峰值通常有 1 个月的滞后,计算 1 个月滞后相关,结果见表 1。总时间序列来看,锋面强度总体与风应力旋度、沿岸风应力和沿岸流相关系数最高,分别为 0.47、0.45 和 0.42。锋面出现概率和覆盖宽度总体与沿岸风应力相关性最高,分别为 0.42 和 0.52。锋面离岸距离总体则与向岸风应力呈负相关,相关系数达-0.55。从季

节来看,冬季,与锋面强度最显著的相关因素是沿岸流,相关性系数达到为 0.66,与风应力旋度、沿岸风应力和向岸风应力相关系数也均高于全年,达到 0.54~0.57。同样的,在冬季的相关系数也大于夏季。相反的,夏季强度与散度的相关系数为 0.52。

### 3.3.2 因果分析

锋面存在的地方往往伴随着海水的辐聚辐散,这也将对锋面上方海表面风场产生影响,因此简单的相关系数计算仅仅反应了两个变量之间存在关联,但并不能揭示锋面和风场之间的因果关系。因此,我们通过计算它们之间的信息流来探究它们之间孰因孰果。

表 2 为锋面和风场之间信息流计算结果。同样

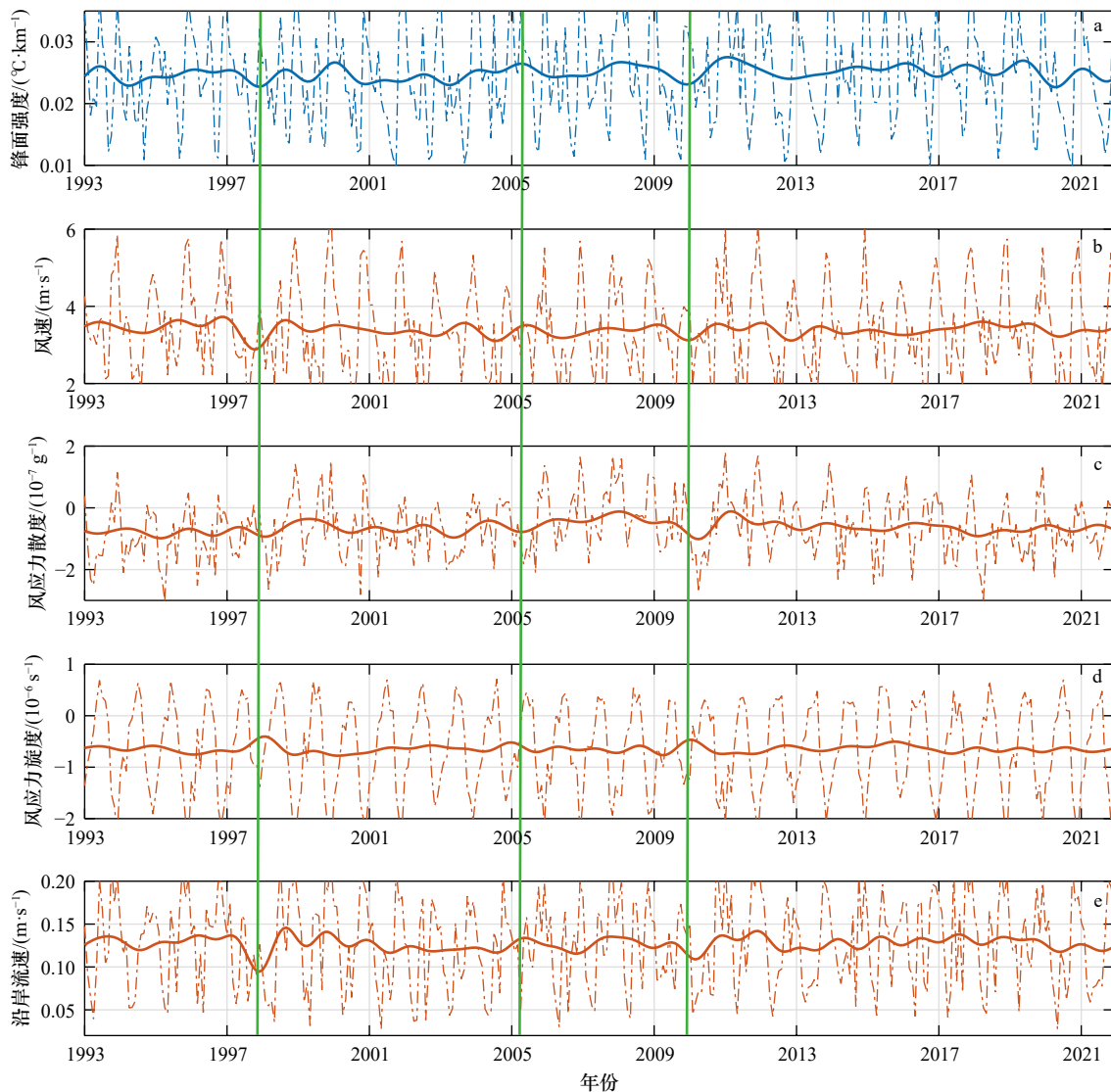


图 10 1993–2021 年月平均序列

Fig. 10 Time series of monthly-mean in 1993–2021

虚线为原始月平均时间序列,实线为 13 个月低通滤波后的时间序列

The dashed line is the original monthly-mean time series, and the solid line is the 13-month low-pass filtered time series

表1 锋面参量与风参量的相关系数  
Table 1 Correlation coefficient between frontal parameters and wind parameters

	沿岸风应力 总体(冬,夏)	向岸风应力 总体(冬,夏)	风应力旋度 总体(冬,夏)	风应力散度 总体(冬,夏)	沿岸流 总体(冬,夏)
锋面强度	0.45*(0.54, 0.50)	0.25*(0.55, 0.15)	0.47*(0.57, 0.3)	0.37*(0.13, 0.52)	0.42*(0.66, 0.56)
出现概率	0.42*(0.67, 0.51)	0.1(0.29, 0.1)	0.32*(0.65, 0.43)	0.32*(0.15, 0.46)	0.25*(0.59, 0.56)
覆盖宽度	0.52*(0.55, 0.58)	0.35*(0.45, 0.03)	0.51*(0.54, 0.47)	0.32*(0.51, 0.53)	0.13(0.62, 0.51)
离岸距离	0.38*(0.60, 0.53)	-0.55*(-0.5, 0.24)	0.2*(0.36, 0.42)	0.2*(0.33, 0.1)	0.1(0.26, 0.22)

注: \*表示相关系数通过95%的置信度检验, 括号内分别为冬季(斜体)和夏季的相关系数。

的, 计算与沿岸风的信息流时, 同样采取了滞后1个月的处理。表中, 信息流方向是由行变量指向列变量, 例如,  $T_{\text{风应力旋度} \rightarrow \text{锋面强度}}$  即风应力旋度序列向锋面强度序列的信息流传递为  $0.28 > 0$ , 而  $T_{\text{锋面强度} \rightarrow \text{风应力旋度}} = -0.14 < 0$ , 故可以判断风应力旋度为锋面强度的因。 $T_{\text{沿岸风} \rightarrow \text{锋面强度}} = 0.1 < T_{\text{风应力旋度} \rightarrow \text{锋面强度}} = 0.28$ , 即说明风应

力旋度作为锋面强度的原因更为显著。通过总结信息流计算结果得出, 风应力旋度是影响锋面强度、出现概率和覆盖宽度较为显著的原因, 而锋面的离岸距离主要是向岸风造成的。风应力旋度产生锋面的原因在于其导致的埃克曼抽吸, 下层冷水上涌, 与表层暖水相遇形成温度锋。

表2 锋面参量和风参量的信息流计算结果  
Table 2 Information flow calculation results between frontal parameters and wind parameters

	锋面强度	出现概率	覆盖宽度	离岸距离	沿岸风	向岸风	风应力旋度
锋面强度	-	-	-	-	0.1	0.03	0.28
出现概率	-	-	-	-	0.12	-0.002	0.14
覆盖宽度	-	-	-	-	0.1	0.05	0.23
离岸距离	-	-	-	-	0.22	0.29	0.09
沿岸风	-0.045	-0.017	-0.02	-0.08	-	-	-
向岸风	-0.03	-0.002	-0.05	0.008	-	-	-
风应力旋度	-0.14	-0.1	-0.12	-0.11	-	-	-

注: 表中“-”为相同变量之间的结果, 无意义。

## 4 讨论

### 4.1 与前人结果对比

本文将再分析数据与现场观测相结合, 从水平分布和垂向上揭示了温度锋的三维结构分布特征。与前人基于模式数据和卫星遥感数据的结果相比<sup>[25, 49-50]</sup>, 本文得到的锋面强度为  $0.03 \sim 0.06 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{km}$ 、覆盖宽度为  $15 \sim 80 \text{ km}$ , 均在合理范围内。而现场观测数据计算的锋面强度大于再分析数据结果, 可能与等温线是否“露头”有关。Jing等<sup>[25]</sup>在海南岛东部的温度锋观测结果也有相似现象。

### 4.2 与 ENSO 和 PDO 的关系

从图5b可以看到, 粤西陆架锋除了季节周期, 还存在21个月周期, 故下文将讨论该锋面的年际变化。基于CMEMS SST计算所得的1993-2021年海表

温度锋强度, 进行13个月的滑动平均以去除季节变化后, 得到了对应的年际变化时间序列, 如图11所示。与判定大尺度气候变化事件的NINO3和PDO指数时间序列相对比, 发现当PDO正位相时的El Niño年, 往往会出现锋面强度的极小值, 而PDO负位相下的La Niña年则对应出现极大值。表层温度锋面强度与两者之间的相关系数分别为-0.20和0.06(锋面时间序列滞后3个月)。

图12分别为8次ENSO事件期间的SST、风场和流场。可以明显看到2000-2001年、2007-2008年、2010-2011年和2020-2021年4次La Niña+PDO负位相期间的锋面强度高值事件中, 风场主要为东北风, 风速均在为2.5 m/s以上, 沿岸流为0.07~0.18 m/s, 强东北季风和强西向沿岸流从高纬度带来更多的冷水占据近岸, 与暖的南海水相遇, 形成强而远离岸线

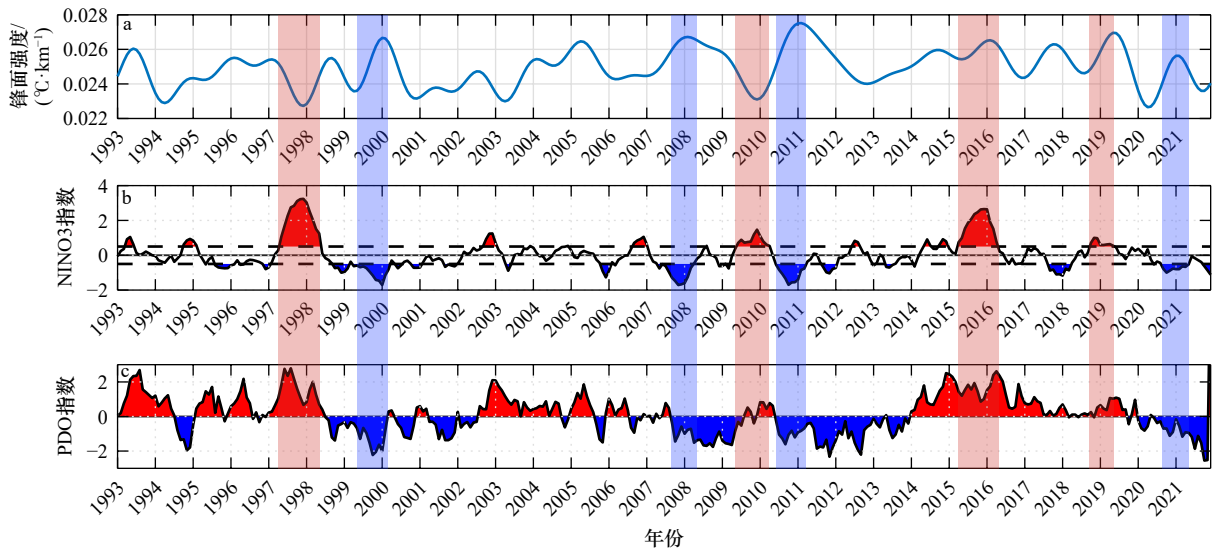


图 11 1993–2021 年锋面强度 (a)、NINO3 指数 (b)、PDO 指数 (c) 的时间序列  
 Fig. 11 Time series of frontal intensity (a), NINO3 index (b), and PDO index (c) in 1993–2021

红色框为 El Niño + PDO 正位相, 蓝色框为 La Niña + PDO 负位相

Red boxes are El Niño + positive phase of PDO, and blue boxes are La Niña + negative phase of PDO

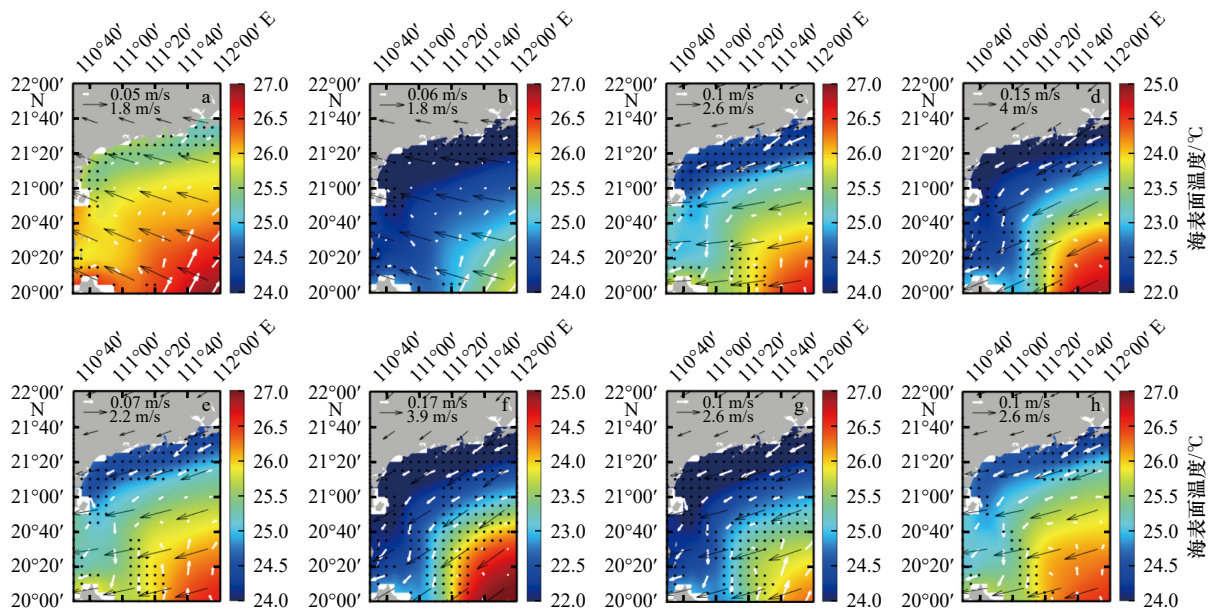


图 12 1993–2021 年 ENSO 事件发生期间的 SST 分布  
 Fig. 12 Distribution of SST during the 1993–2021 ENSO events

a. 1997–1998 年 El Niño; b. 2009–2010 年 El Niño; c. 2015–2016 年 El Niño; d. 2018–2019 年 El Niño; e. 1999–2000 年 La Niña; f. 2007–2008 年 La Niña; g. 2010–2011 年 La Niña; h. 2020–2021 年 La Niña. 白色箭头为表面流速, 黑色箭头为海上 10 m 风矢量, 黑色实心点位置为锋面位置  
 a. 1997–1998 El Niño; b. 2009–2010 El Niño; c. 2015–2016 El Niño; d. 2018–2019 El Niño; e. 1999–2000 La Niña; f. 2007–2008 La Niña; g. 2010–2011 La Niña; h. 2020–2021 La Niña. White arrows are surface currents, black arrows are offshore 10 m wind vector and the black solid dot position is the frontal areas

的温度锋。而 1997–1998 年和 2009–2010 年两次 El Niño + PDO 正位相锋面强度低值事件期间, 沿岸流速为 0.05~0.06 m/s, 风速均在 2 m/s 以下, 且主要为偏西南风, 不利于高纬冷水向南输送, 锋面主要是由近岸的冷水与外海暖水产生, 故强度偏弱且离岸更近。而 2015–2016 年和 2018–2019 年的 El Niño + PDO 正

位相期间并未出现锋面强度低值, 其风场和流场与前两次 El Niño + PDO 正位相事件不同, 流速均在 0.1 m/s 以上且风场主要为东北风, 可能是中部型 El Niño 和东部型 El Niño 之间的差异所造成。风场和流场结果表明, 大尺度气候变化过程使风场发生变化<sup>[51–52]</sup>, 进而对流场产生调制, 并对当地沿岸锋面产生影响。

## 5 结论

本文利用1993–2021年共29年的再分析SST和风场资料,分析了粤西陆架海表面温度锋强度、出现概率、离岸距离和覆盖宽度等参数的季节变化。在此基础上,利用2018年春季、夏季和2019年夏季高精度的现场观测,分析了温度锋在次表层的三维结构,并与再分析资料锋面结果进行对比分析,得到了以下结论:

(1)粤西陆架海表层温度锋面存在明显的季节性变化。海表温度锋沿着等深线分布,主要体现为冬季最强,锋面强度、出现概率和覆盖范围均最大,可达 $0.049^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 、75%和66 km。而春季和夏季则次之,锋面强度分别为 $0.038^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 和 $0.043^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,而秋季则几乎完全消失。且冬季离岸远,夏季近,离岸距离分别

为50 km和23.1 km。

(2)粤西近岸和陆架温度锋面的垂向变化特征不同。春夏季20 m等深线以浅海域的温度锋面随着深度增加,强度减弱,覆盖范围也慢慢向近岸收缩。这一海域的锋面是沿岸暖水与冷的外海水相遇形成,主要出现在表层。而20 m等深线以深海域出现的锋面,随着深度的增加,锋面位置向岸推移,锋面强度也增加,在次表层的锋面强度明显强于表层。

(3)粤西温度锋存在年际变化,La Niña + PDO负位相时会出现锋面强度极大值且离岸远,而El Niño + PDO正位相时则对应锋面强度极小值且离岸近。风场和流场结果表明,La Niña事件期间风和流带来的高纬度冷水比El Niño期间的更多,导致两个事件期间锋面特征不同。

## 参考文献:

- [1] 鲍曼 M J, 埃萨阿斯 W E. 沿岸过程中的海洋锋 [M]. 许建平, 刘仁清, 译. 北京: 海洋出版社, 1987.
- [2] Bowman M J, Esaias W E. Oceanic Fronts in Coastal Processes[M]. Xu Jianping, Liu Renqing, trans. Beijing: China Ocean Press, 1987.
- [3] 冯士筮, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [4] Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. An Introduction to Marine Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [5] Saldías G S, Hernández W, Lara C, et al. Seasonal variability of SST fronts in the Inner Sea of Chiloé and its adjacent coastal ocean, northern Patagonia[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(2): 181.
- [6] Bost C A, Cotté C, Bailleul F, et al. The importance of oceanographic fronts to marine birds and mammals of the southern oceans[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 78(3): 363–376.
- [7] Pollard R T, Regier L A. Vorticity and vertical circulation at an ocean front[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1992, 22(6): 609–625.
- [8] Chelton D B, Esbensen S K, Schlax M G, et al. Observations of coupling between surface wind stress and sea surface temperature in the eastern Tropical Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(7): 1479–1498.
- [9] Small R J, deSzoek S P, Xie S P, et al. Air-sea interaction over ocean fronts and eddies[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2008, 45(3/4): 274–319.
- [10] Ferrari R. A frontal challenge for climate models: an unusually detailed portrait of an ocean front off Japan could help improve climate predictions[J]. *Science*, 2011, 332(6027): 316–317.
- [11] 宁修仁, 刘子琳, 蔡昱明. 我国海洋初级生产力研究二十年 [J]. 东海海洋, 2000, 18(3): 13–20.
- [12] Ning Xiuren, Liu Zilin, Cai Yuming. A review on primary production studies for China seas in the past 20 years[J]. *Donghai Marine Science*, 2000, 18(3): 13–20.
- [13] Li Q P, Zhou Weiwen, Chen Yinchao, et al. Phytoplankton response to a plume front in the northern South China Sea[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(8): 2551–2563.
- [14] Liu Zijia, Li Q P, Ge Zaiming, et al. Variability of plankton size distribution and controlling factors across a coastal frontal zone[J]. *Progress in Oceanography*, 2021, 197: 102665.
- [15] Lü Ting, Liu Dongyan, Zhou Peng, et al. The coastal front modulates the timing and magnitude of spring phytoplankton bloom in the Yellow Sea[J]. *Water Research*, 2022, 220: 118669.
- [16] Hu Jianyu, Zhuang Wei, Zhu Jia, et al. Temperature, salinity and water mass in the South China Sea[M]//Hu Jianyu, Ho C R, Xie Lingling, et al. Regional Oceanography of the South China Sea. New Jersey: World Scientific, 2020: 43–75.
- [17] Xie Lingling, Zheng Quanan, Li Mingming, et al. Responses of the South China Sea to mesoscale disturbances from the Pacific[M]//Hu Jianyu, Ho C R, Xie Lingling, et al. Regional Oceanography of the South China Sea. New Jersey: World Scientific, 2020: 243–287.
- [18] Zhu Jia, Zheng Quanan, Hu Jianyu, et al. Classification and 3-D distribution of upper layer water masses in the northern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(4): 126–135.
- [19] 徐洪周, 许金电, 李立, 等. 2001年冬春转换期间南海东北部水文和环流特征 [J]. 海洋学报, 2007, 29(5): 10–20.
- [20] Xu Hongzhou, Xu Jindian, Li Li, et al. Hydrography and circulation characteristics about the northeast area of South China Sea during March 2001[J]. *Haiyang Xuebao*, 2007, 29(5): 10–20.
- [21] Yu Yi, Xing Xiaogang, Liu Hailong, et al. The variability of chlorophyll-*a* and its relationship with dynamic factors in the basin of the South China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2019, 200: 103230.
- [22] 王磊, 王丽娅, 魏皓. 利用卫星遥感资料对南海北部陆架海洋表层温度锋的分析 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2004, 34(3): 351–357.

- Wang Lei, Wang Liya, Wei Hao. An analysis of the sea-surface thermal fronts in the northern shelf region of the South China Sea with satellite data[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(3): 351–357.
- [19] Dong Jihai, Zhong Yisen. Submesoscale fronts observed by satellites over the northern South China Sea shelf[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2020, 91: 101161.
- [20] 谢玲玲, 张书文, 赵辉. 琼东上升流研究概述 [J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(4): 35–41.  
Xie Lingling, Zhang Shuwen, Zhao Hui. Overview of studies on Qiongdong upwelling[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(4): 35–41.
- [21] Wang Dongxiao, Liu Yun, Qi Yiquan, et al. Seasonal variability of thermal fronts in the northern South China Sea from satellite data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(20): 3963–3966.
- [22] 陈彪, 王静, 经志友, 等. 琼东和粤西海表温度锋的季节与年际变化特征分析 [J]. *热带海洋学报*, 2016, 35(5): 1–9.  
Chen Biao, Wang Jing, Jing Zhiyou, et al. Seasonal and interannual variation of thermal fronts off the east coast of Hainan Island and the west coast of Guangdong[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2016, 35(5): 1–9.
- [23] Wang Y, Yu Y, Zhang Y, et al. Distribution and variability of sea surface temperature fronts in the South China Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 240: 106793.
- [24] Zhao Linhong, Yang Dingtian, Zhong Rong, et al. Interannual, seasonal, and monthly variability of sea surface temperature fronts in off-shore China from 1982–2021[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5336.
- [25] Jing Zhiyou, Qi Yiquan, Fox-Kemper B, et al. Seasonal thermal fronts on the northern South China Sea shelf: satellite measurements and three repeated field surveys[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(3): 1914–1930.
- [26] Zhang Yan, Zeng Lili, Wang Qiang, et al. Seasonal variation in the three-dimensional structures of coastal thermal front off western Guangdong[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40(7): 88–99.
- [27] Wang Guihua, Li Jiaxun, Wang Chunzai, et al. Interactions among the winter monsoon, ocean eddy and ocean thermal front in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C8): C08002.
- [28] Yang Chaoyu, Ye Haibin. The features of the coastal fronts in the eastern Guangdong coastal waters during the downwelling-favorable wind period[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 10238.
- [29] 经志友, 齐义泉, 华祖林. 南海北部陆架区夏季上升流数值研究 [J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(3): 1–8.  
Jing Zhiyou, Qi Yiquan, Hua Zulin. Numerical study on summer upwelling over northern continental shelf of South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(3): 1–8.
- [30] 许金电, 蔡尚湛, 宣莉莉, 等. 粤东至闽南沿岸海域夏季上升流的调查研究 [J]. *热带海洋学报*, 2014, 33(2): 1–9.  
Xu Jindian, Cai Shangzhan, Xuan Lili, et al. Observational study on summertime upwelling in coastal seas between eastern Guangdong and southern Fujian[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2014, 33(2): 1–9.
- [31] 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: Oceans*, 2011, 116(C2): C02033.
- [32] 谢玲玲, 宗晓龙, 伊小飞, 等. 琼东上升流的年际变化及长期变化趋势 [J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(1): 43–51.  
Xie Lingling, Zong Xiaolong, Yin Xiaofei, et al. The interannual variation and long-term trend of Qiongdong upwelling[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(1): 43–51.
- [33] Xie Lingling, Pallàs-Sanz E, Zheng Quanan, et al. Diagnosis of 3D vertical circulation in the upwelling and frontal zones east of Hainan Island, China[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(4): 755–774.
- [34] Geng Bingxu, Xiu Peng, Liu Na, et al. Biological response to the interaction of a mesoscale eddy and the river plume in the northern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(9): e2021JC017244.
- [35] Chelton D B, Xie Shangping. Coupled ocean-atmosphere interaction at oceanic mesoscales[J]. *Oceanography*, 2010, 23(4): 52–69.
- [36] Byrne D, Papritz L, Frenger I, et al. Atmospheric response to mesoscale sea surface temperature anomalies: assessment of mechanisms and coupling strength in a high-resolution coupled model over the South Atlantic[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2015, 72(5): 1872–1890.
- [37] Oerder V, Colas F, Echevin V, et al. Mesoscale SST–wind stress coupling in the Peru–Chile current system: which mechanisms drive its seasonal variability?[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 47(7): 2309–2330.
- [38] Li Jing, Shao Min. Response of Asian marine fishery to ENSO related SST for the period 1982–2016[J]. *Oceanography & Fisheries Open access Journal*, 2019, 9(3): 555763.
- [39] Wang Yuntao, Castelao R M. Variability in the coupling between sea surface temperature and wind stress in the global coastal ocean[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 125: 88–96.
- [40] Liang X S. Unraveling the cause-effect relation between time series[J]. *Physical Review E*, 2014, 90(5): 052150.
- [41] Liang X S. Normalizing the causality between time series[J]. *Physical Review E*, 2015, 92(2): 022126.
- [42] Lin Peigen, Cheng Peng, Gan Jianping, et al. Dynamics of wind-driven upwelling off the northeastern coast of Hainan Island[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(2): 1160–1173.
- [43] 孙湘平. 中国近海区域海洋 [M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 109–110.  
Sun Xiangping. *China Offshore Area*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 109–110.
- [44] Wang Dongxiao, Hong Bo, Gan Jianping, et al. Numerical investigation on propulsion of the counter-wind current in the northern South China Sea in winter[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2010, 57(10): 1206–1221.

- [45] 谢玲玲, 曹瑞雪, 尚庆通. 粤西近岸环流研究进展 [J]. 广东海洋大学学报, 2012, 32(4): 94–98.  
Xie Lingling, Cao Ruixue, Shang Qingtong. Progress of study on coastal circulation near the shore of western Guangdong[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2012, 32(4): 94–98.
- [46] Xue Huijie, Chai Fei, Pettigrew N, et al. Kuroshio intrusion and the circulation in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2004, 109(C2): C02017.
- [47] Nan Feng, Xue Huijie, Chai Fei, et al. Identification of different types of Kuroshio intrusion into the South China Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 2011, 61(9): 1291–1304.
- [48] Shu Yejiang, Wang Qiang, Zu Tingting. Progress on shelf and slope circulation in the northern South China Sea[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(5): 560–571.
- [49] 朱凤芹, 谢玲玲, 成印河. 南海温度锋的分布特征及季节变化 [J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(4): 695–702.  
Zhu Fengqin, Xie Lingling, Cheng Yinhe. Distribution and seasonal variations of temperature front in the South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(4): 695–702.
- [50] 赵宝宏, 刘宇迪, 赵加华, 等. 南海海洋锋季节分布特征初探 [C]//第 28 届中国气象学会年会——S17 第三届研究生年会. 厦门: 中国气象学会, 2011.  
Zhao Baohong, Liu Yudi, Zhao Jiahua, et al. Seasonal distribution characteristics of ocean front in the South China Sea[C]//The 28th Annual Meeting of the China Meteorological Society. Xiamen: China Meteorological Society, 2011.
- [51] 郭艳君, 倪允琪. ENSO 期间赤道太平洋对流活动异常对我国冬季风的影响 [J]. 气象, 1998, 24(9): 3–7.  
Guo Yanjun, Ni Yunqi. Effects of the Tropical Pacific convective activities on China's winter monsoon[J]. *Meteorological Monthly*, 1998, 24(9): 3–7.
- [52] Zhu Anbao, Xu Haiming, Deng Jiechun, et al. El Nino–Southern Oscillation (ENSO) effect on interannual variability in spring aerosols over East Asia[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(8): 5919–5933.

### 3D structure and seasonal variation of temperature fronts in the shelf sea west of Guangdong

Tan Keyi<sup>1,2</sup>, Xie Lingling<sup>1,2,3</sup>, Li Mingming<sup>1,2,3</sup>, Li Min<sup>1,2,3</sup>, Li Junyi<sup>1,2,3</sup>

(1. Laboratory of Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction, College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Key Laboratory of Climate, Resources and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Ocean, Zhanjiang 524088, China; 3. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Using reanalysis sea surface data and in-situ high-resolution observations in spring, summer 2018, and summer 2019, this study analyzes the 3D structure and seasonal variation of temperature fronts in the shelf sea west of Guangdong. The results show that the sea surface temperature (SST) fronts reach the strongest intensity up to 0.049°C/km in winter, with the largest occurrence probability of 75% and coverage of 66 km. The SST fronts weaken in spring and summer, and almost disappear in autumn. The average offshore distance of the front is 50 km in winter and 23.1 km in summer. The *in-situ* observations show a strong thermal front in coastal areas shallower than 20 m in both spring and summer. The front gets weaker and closer to the coast in deeper layers and is associated with warm coastal water and cold shelf water. In shelf areas deeper than 20 m, the fronts in the subsurface layer are stronger than in the surface layer and shift shoreward in deeper layers. The correlation coefficient and information flow between the surface wind and frontal parameters reveal that the surface wind stress curl and along-coast wind are the most important factors affecting the surface thermal front. These thermal fronts also have interannual variations, with maximum intensity in La Niña years with negative PDO and minimum intensity in El Niño years with positive PDO.

**Key words:** ocean front; seasonal variation; 3D structure; information flow; shelf west of Guangdong