

# 基于南海温盐流数值产品的南海气候态温跃层、温度锋和中尺度涡评估

尹汉军<sup>1</sup>, 谢波涛<sup>1</sup>, 黄必桂<sup>1</sup>, 朱宇航<sup>2,3\*</sup>, 彭世球<sup>2,3,4</sup>, 李毅能<sup>2</sup>, 程高磊<sup>2</sup>

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100027; 2. 中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室, 广东 广州 510301; 3. 北部湾大学 广西北部湾海洋灾害研究重点实验室, 广西 钦州 535011; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458)

**摘要:** 基于区域海洋模式(ROMS)构建了一套覆盖南海区域40 a分辨率的逐时温盐流数值产品 OCEAN\_SCS, 并利用独立观测资料和前人的研究成果对比评估了 OCEAN\_SCS 数据集对南海温跃层、温度锋和中尺度涡的模拟效果。评估结果表明: OCEAN\_SCS 数据集总体上对南海温跃层、温度锋和中尺度涡的模拟效果较好, 与前人的研究成果和混合坐标海洋模型(HYCOM)再分析数据产品的计算结果也较为相符, 仅在中尺度涡数量、生命周期长度、半径和海表涡动能的模拟上与观测稍有偏差, 这也是目前数值模式在模拟中尺度涡方面的瓶颈。研究结果表明 OCEAN\_SCS 数据集能够为进一步研究南海温跃层、温度锋和中尺度涡的消长变化规律等提供数据支撑, 可用于更全面地研究南海的海洋环境特征, 服务于南海海洋环境保障工作。

**关键词:** 南海; 海洋数值产品; 温跃层; 温度锋; 中尺度涡

**中图分类号:** P731.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)04-0034-13

## 0 引言

南海作为我国最大的边缘海, 地理战略地位极其重要。南海不仅拥有丰富的油气、矿产、渔业等资源, 同时也是连接西北太平洋与印度洋的重要输运通道, 其海上航行、渔业捕捞、工程作业等活动频繁。但是, 受东亚季风和黑潮的影响, 南海海洋环境状况复杂, 海上灾害频发, 严重影响着我国在南海诸多活动的安全。因此, 为了维护我国在南海的核心利益, 确保我国在南海海上活动的安全, 亟需不断加强南海的海洋环境保障。

海洋环境要素对南海海洋环境的影响不仅体现在温盐流和水位等常规要素中, 更体现在包括温

跃层、温度锋和中尺度涡等海洋现象要素中, 它们对海上活动的安全保障有着各自的影响。海洋温跃层是海洋水体温度在垂向上急剧变化的过渡层, 其分布直接影响着海水的声呐探测, 进而影响海上航行安全; 此外, 温跃层与内波的关系十分密切, 内波作为南海海域较为活跃的海洋现象之一, 对海上工程设施等有着潜在的巨大破坏力, 因此, 南海温跃层也间接影响着南海海上工程设施的安全。南海温跃层有着典型的季节变化特征<sup>[1-5]</sup>, 不同季节其结构分布差别巨大, 因此要消除温跃层对南海海洋活动安全的负面影响, 必须对南海温跃层的时空分布特征有深入的了解。温度锋也是南海特别是其北部海域常见的海洋现象之一。温度锋指的是海

收稿日期: 2022-08-30。

基金项目: 广东省重点工程(2019BT2H594); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0303); 广西重点研发计划(桂科 AB18294047); 深水浮式平台一体化在线监测与分析软件集成系统研制(LSZX-2020-HN-05-04); 海上油气田精细化环境预报与参数区划关键技术(YXKY-ZX 07 2020); 南海北部内波区划及工程参数研究(YXKY-ZX 10 2021); 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA15020901); 广东省重点领域研发计划项目(2019B111101002); 广西北部湾海洋灾害研究重点实验室(北部湾大学)开放课题(2021KF01)。

第一作者: 尹汉军(1973-), 男, 教授级高工, 本科, 主要从事海洋工程方面的研究。E-mail: yhj@enooc.com.cn

\*通信作者: 朱宇航(1990-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事海洋数值模拟与资料同化研究。E-mail: yhzhu@scsio.ac.cn

洋水平方向上毗邻的温度明显不同的两种或几种水体之间的狭长过渡带。前人研究表明,南海温度锋受风应力、大尺度环流和气候变暖等影响,其分布和出现频率表现出明显的季节变化特征<sup>[6-7]</sup>。温度锋在陆架海系统中起着重要的作用,并影响着陆架海的生态环境、渔业环境和区域气候<sup>[8-9]</sup>,在海洋渔业、环境保护、水声技术利用等方面具有重要的应用价值。中尺度涡是南海海域最重要的海洋现象之一,其在南海海域活动频繁<sup>[10-11]</sup>。南海中尺度涡在南海海洋动量、热量及其他示踪物(如叶绿素等)的输送中起着重要的作用<sup>[12]</sup>,对渔业发展有着重要的影响;此外,中尺度涡引起的海洋层结变化也严重影响声呐水声探测和船只的安全航行。综上所述,南海海洋环境保障不仅要求获取准确的南海常规海洋要素信息,还需要对南海的现象要素有精确的感知。

南海海洋环境保障研究离不开数据,特别是长时间连续和高时空分辨率的海洋数据集的支持,数据集主要来自于数值模式模拟产品和再分析数据产品。目前,国内外覆盖南海区域的上述产品不少,例如:国际著名的简单海洋数据同化(Sample Ocean Data Assimilation, SODA)再分析产品<sup>[13-14]</sup>,其空间分辨率为 $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ ,但时间分辨率仅为5 d;混合坐标大洋环流模式(Hybrid Coordinate Ocean Model, HYCOM)再分析数据集<sup>[15]</sup>的空间分辨率为 $1/12^\circ \times 1/12^\circ$ ,时间分辨率为1 d;国内自主研发的中国海洋再分析(China Ocean Reanalysis, CORA) v1.0数据产品<sup>[16-17]</sup>的空间分辨率为 $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ ,时间分辨率为1 d;南海海洋再分析(Reanalysis Dataset of the South China Sea, REDOS) v1.0产品<sup>[18]</sup>的空间分辨率为 $1/10^\circ \times 1/10^\circ$ ,时间分辨率为1 d;全球高分辨率冰-海耦合再分析产品(CORAv2.0)为国内仅有的含潮再分析数据集,空间分辨率为 $1/12^\circ \times 1/12^\circ$ ,时间分辨率为1 d。以上覆盖南海海区的数值产品的空间分辨率皆为涡分辨率,基本满足南海中尺度海洋现象的分析要求,但大部分数据的时间分辨率较粗,且不包含潮强迫,无法满足对南海潮汐和潮流及更小时间尺度现象的研究需求。

因此,本研究基于区域海洋模式系统(Regional Ocean Model System, ROMS)构建了一套覆盖南海区域40 a(1980—2019年)的涡分辨率逐时温盐流数

据集产品 OCEAN\_SCS,以支撑南海海洋环境保障的数据需求。通过与各类实测资料对比,我们前期验证了 OCEAN\_SCS 数据集对南海海表温度(Sea Surface Temperature, SST)、盐度、流场、海表高度(Sea Surface Height, SSH)和水位的模拟精度<sup>[19]</sup>。本研究我们将从海洋现象要素(包括季节性温跃层、温度锋和中尺度涡)的角度对 OCEAN\_SCS 数据集进行进一步的评估,同时参与对比的还有包含了资料同化的HYCOM再分析数据产品。

## 1 数据集介绍

### 1.1 模式介绍与设置

OCEAN\_SCS数据集基于ROMS<sup>[20-21]</sup>构建,版本为法国发展研究院(Institut de Recherche pour le Développement, IRD)开发的ROMS\_ARGIF 3.3.1<sup>[22-23]</sup>。模式区域范围包括了南海和部分西北太平洋区域( $99^\circ \sim 134^\circ \text{E}$ ,  $1^\circ \sim 30^\circ \text{N}$ , 见图1),水平分辨率为 $1/10^\circ \times 1/10^\circ$ ,垂向采用S坐标,分32层。模式海底地形采用国际航道测量组织(International Hydrographic Organization, IHO)提供的 $15'' \times 15''$ 世界大洋深度图(General Bathymetric Chart of the Ocean, GEBCO)2019版数据<sup>[24]</sup>。为了减少大梯度地形对模式模拟精度的影响,本研究将GEBCO 2019地形数据插值到模式网格点的同时对地形数据进行了适当的平滑。模式开边界方案为适合潮强迫的Flather边界方案,垂向混合方案采用KPP(K-profile parameterization)方案<sup>[25]</sup>。模式最大和最小水深分别设置为5 000 m和10 m,积分时间步长为600 s。

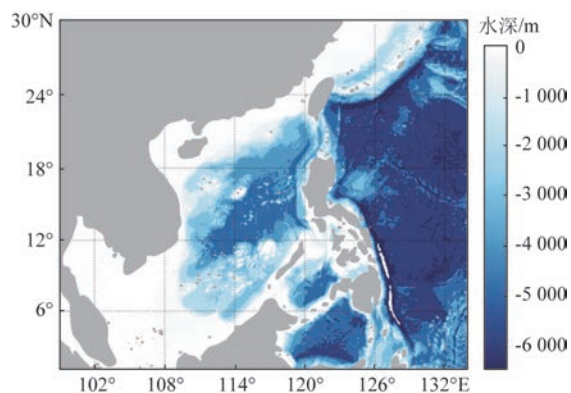


图1 模式区域范围和地形

Fig.1 The model domain and topography

## 1.2 数据集构建

模式侧边界条件使用的温盐流和SSH数据来自SODA<sup>[26-28]</sup>3.4.2版本每5 d一次的结果,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。大气强迫数据包括10 m风场,短波辐射、长波辐射、海表气温、海表湿度、降水率,数据源为欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的第五代大气再分析产品 ERA5 (Fifth Generation ECMWF Atmospheric Reanalysis)<sup>[29]</sup>每6 h一次的结果,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。为了提高大气风场强迫的精度,本研究将ERA5的10 m风场数据与HOLLAND<sup>[30]</sup>模式的经验台风风场数据进行融合作为模式强迫风场。大气强迫数据通过块体公式<sup>[31]</sup>转化为模式所需风应力、热通量和淡水通量,其中风应力计算取自PENG等<sup>[32]</sup>的南海最优风应力拖曳系数计算公式。

模式的侧边界潮强迫采用基于10个主要分潮( $M_2$ 、 $S_2$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$ 、 $M_4$ 、 $MS_4$ )的调和常数计算的潮位和潮流,数据来自于俄亥俄州立大学提供的TPX08全球潮汐数据产品<sup>[33]</sup>,水平分辨率为 $1/30^\circ \times 1/30^\circ$ 。我们将TPX08数据插值到本模式开边界的网格上,然后计算开边界处的潮汐和潮流预报值,并分别加到SODA数据集的SSH和流场中作为开边界强迫。公式如下:

$$\eta = A_0 + \sum_i H_i \cos(\sigma_i t + V_{0i} - g_i) \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为水位/流速的东西( $u$ )/南北( $v$ )分量; $A_0$ 为平均海面高度,此处设为0(计算潮流时 $A_0$ 也为0); $H$ 和 $g$ 是分潮水位/流速的振幅和迟角; $V_0$ 是分潮的格林威治天文初相角,决定推算的起始时刻; $\sigma$ 为分潮的角速度;下标 $i$ 代表不同的分潮。

OCEAN\_SCS数据集在构建前需要一个动力平衡的海洋初始场。本研究首先利用SODA 3.4.2数据集和ERA5数据集40 a(1980—2019年)的气候态月平均场对模式进行驱动,即“SPIN-UP”过程,在该过程中模式不添加潮强迫。经过10 a的“SPIN-UP”模拟,我们获得了一个动力上相对稳定的海洋初始状态场,并基于此初始场进行40 a的真实模拟。我们将模式模拟输出的基于sigma坐标的结果插值到从海表~5 000 m水深共分为40层的深度坐标中(0 m、2 m、4 m、6 m、8 m、10 m、12 m、15 m、20 m、25 m、30 m、35 m、40 m、45 m、50 m、60 m、70 m、

80 m、90 m、100 m、125 m、150 m、200 m、250 m、300 m、350 m、400 m、500 m、600 m、700 m、800 m、900 m、1 000 m、1 250 m、1 500 m、2 000 m、2 500 m、3 000 m、4 000 m、5 000 m),并按每24 h为一个数据文件以网络通用数据格式(Network Common Data Form, NetCDF)输出,从而得到最终的OCEAN\_SCS数据集。OCEAN\_SCS数据集的详细介绍可参考文献[19]。

## 2 海洋现象要素评估

### 2.1 温跃层评估

#### 2.1.1 评估方法

温跃层的评估主要对象为OCEAN\_SCS数据集多年月平均状态场计算的南海季节性温跃层参数,包括温跃层上界深度(即温跃层深度)、温跃层厚度和温跃层强度,评估范围为 $99^\circ \sim 122^\circ \text{E}$ ,  $1^\circ \sim 30^\circ \text{N}$ ,评估参照的对象为前人的研究成果和基于HYCOM再分析数据产品计算的结果。季节性温跃层的评估方法如下:首先分别计算OCEAN\_SCS数据集40 a平均和HYCOM再分析数据产品20 a(1997—2016年)平均的月平均温度场,然后针对每个月温度场的每个水平格点的垂向温度廓线进行温跃层参数的判定,最终绘制南海区域的季节性温跃层参数分布图,并与前人的研究成果进行比较。

本研究中季节性温跃层各个参数的定义如下:当一条垂向温度廓线某一段的垂向梯度 $\geq$ 临界值时,则将该段定义为季节性温跃层,以该段的顶部水深为季节性温跃层深度,该段的垂向范围为季节性温跃层厚度。当水深 $>200$  m时,临界值设为 $0.05^\circ \text{C/m}$ ;水深 $\leq 200$  m时,临界值设为 $0.2^\circ \text{C/m}$ <sup>[4,34]</sup>。季节性温跃层强度则定义为温跃层整层的垂向温度梯度<sup>[35]</sup>。

#### 2.1.2 评估结果

图2为基于OCEAN\_SCS数据集计算的多年平均态1月和7月的南海季节性温跃层深度、厚度和强度的水平分布。从图2a、2b可以看到,南海季节性温跃层深度呈现出明显的季节变化特征。冬季,温跃层深度呈现出由东南(约30 m)—西北(约90 m)变深的分布趋势,且区域边界处的温跃层深度梯度较大,同时,在吕宋岛和加里曼丹岛西北海域各出现一低值区(小于30 m);而夏季,温跃层深度全场平均值明显低于冬季,且呈现出由西北(约10 m)—



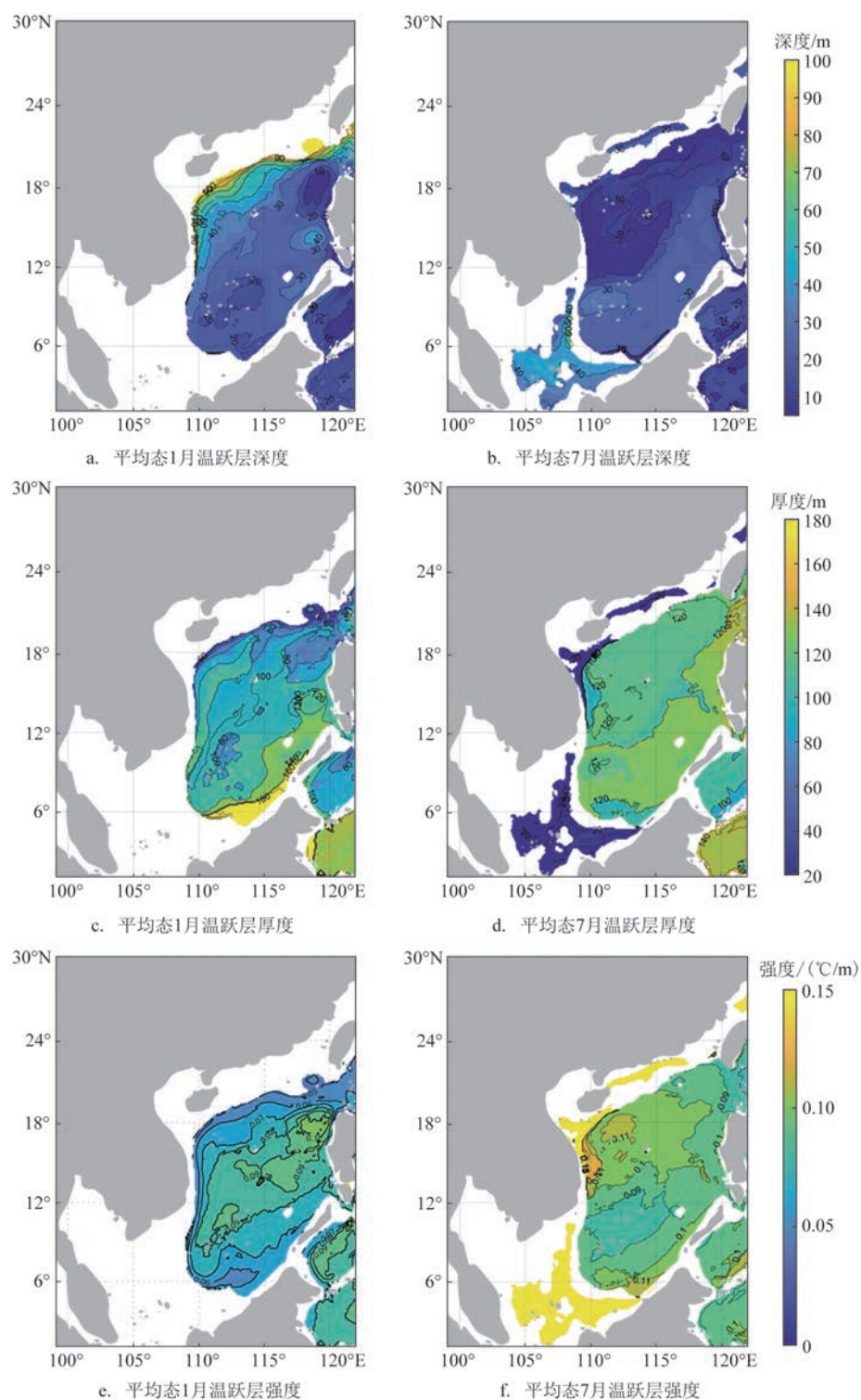


图2 OCEAN\_SCS数据集多年月平均态1月与7月的南海季节性温跃层深度、厚度和强度水平分布图

Fig.2 Climatological distributions of depth, thickness and strength of seasonal thermocline in the SCS in January and July from the OCEAN\_SCS dataset

东南(约30 m)变深的分布趋势,其高值区和低值区由贯穿海盆东北—西南方向的分界线隔开。与

前人基于观测数据产品的计算结果相比<sup>[4]</sup>, OCEAN\_SCS数据集模拟的南海季节性温跃层深

度不论是量值上还是时空分布特征上都十分相似。图 2c、2d 为 OCEAN\_SCS 数据集模拟的多年平均态 1 月和 7 月的南海季节性温跃层厚度,从图中可以看出,温跃层厚度的空间分布形态与温跃层深度相似。冬季,温跃层厚度基本在 100 m 左右,且呈现由西北—东南递增的变化趋势;而夏季,温跃层深度的分布同样由贯穿海盆东北—西南方向的分界线隔开,呈现西北部低值区和东南部高值区的分布状态,整体量值大于冬季。OCEAN\_SCS 数据集模拟的季节性温跃层厚度与前人的模式模拟结果<sup>[5]</sup>在时空分布形态上也十分相似,但量值偏小。南海夏季季节性温跃层强度整体小于冬季(见图 2e、f),冬季,温跃层强度高值区位于海盆中部深水区,而夏季温跃层强度空间分布与冬季相反,高值区位于海盆周围陆架区,这种分布形态也与前人的模式模拟结果相似<sup>[5]</sup>。

图 3 为基于 HYCOM 再分析数据产品的南海季节性温跃层深度、厚度和强度的水平分布计算结果。从图中可以看出,季节性温跃层各参量在空间分布上与 OCEAN\_SCS 数据集的计算结果较为一致,但温跃层深度和厚度量值稍大于 OCEAN\_SCS 数据集的计算结果,温跃层强度量值则与 OCEAN\_SCS 数据集的计算结果相当。

## 2.2 温度锋评估

### 2.2.1 评估方法

我们对 OCEAN\_SCS 数据集多年季节平均状态场的温度锋分布和月平均状态场的温度锋出现频率分布进行评估,评估范围同温跃层。评估参照对象为基于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)发布的 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) V2 格点化卫星 SST 产品和 HYCOM 再分析数据产品计算的温跃层以及前人的研究成果。评估方法为:首先分别计算 OCEAN\_SCS 数据集 40 a 平均的季节平均 SST 场、HYCOM 再分析数据产品 20 a (1997—2016 年)平均的季节平均 SST 场和 AVHRR V2 数据产品多年(1982—2013 年)平均的季节平均 SST 场,然后基于温度锋的判定方法和标准计算相关参数并进行对比;另外,基于 OCEAN\_SCS 数据集统计了 40 a 的月平均 SST 场温

度锋出现的概率空间分布,并与前人的研究成果进行对比。

温度锋的判定采用水平温度梯度法<sup>[36-38]</sup>,即首先计算区域内格点的 SST 水平梯度 GM,然后选取温度梯度大于临界值的格点作为温度锋点,临界值等值线包围的 GM 大于临界值的区域则作为温度锋区。这里,我们选择 0.03 °C 作为温度锋判定的 GM 临界值<sup>[7]</sup>。GM 计算方法为:

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

式中:  $T$  表示 SST,  $x$  和  $y$  分别表示经向和纬向方向坐标。

### 2.2.2 评估结果

图 4 为基于 OCEAN\_SCS 数据集、HYCOM 再分析数据产品和 AVHRR V2 数据产品计算的 SST 水平梯度及温度锋区分布。从图中可以看出,基于 OCEAN\_SCS 数据集计算的 SST 水平梯度和温度锋区分布特征为:①南海温度锋主要分布于南海北部沿岸,且冬夏季季风期 SST 水平梯度整体大于春秋季节季风转换期(见图 4a、4d、4g、4j);②冬季受东北季风影响,低温的南海沿岸流从东北流向西南,在南海北部沿岸形成显著的温度锋区(见图 4a);③夏季受西南季风影响,南海北部的温度锋区主要集中在粤西沿岸和海南岛沿岸(见图 4g)。基于 HYCOM 再分析数据产品(见图 4b、4e、4h、4k)与 OCEAN\_SCS 数据集(见图 4a、4d、4g、4j)计算的 SST 水平梯度的空间分布和量值都极为相似。考虑到 HYCOM 再分析数据产品同化了包括卫星观测和现场观测的 SST 数据,因此,该结果表明 OCEAN\_SCS 数据集对南海温度锋的空间分布和量值的模拟精度较高。与基于 OCEAN\_SCS 数据集计算的 SST 水平梯度相比(见图 4a、4d、4g、4j),基于 AVHRR V2 数据产品计算的结果(见图 4c、4f、4i、4l)在时空分布上与之相似,但梯度量值明显弱于前者。这可能是由于 AVHRR V2 数据产品的水平分辨率较低( $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ ), SST 水平分布较为平滑导致的。

图 5 为基于 OCEAN\_SCS 数据集计算的南海北部月平均场的温度锋出现频率空间分布。由于南海温度锋主要分布在南海北部沿岸,且为了更直观地与前人的计算结果<sup>[7,37]</sup>进行比较,本文只展示了南

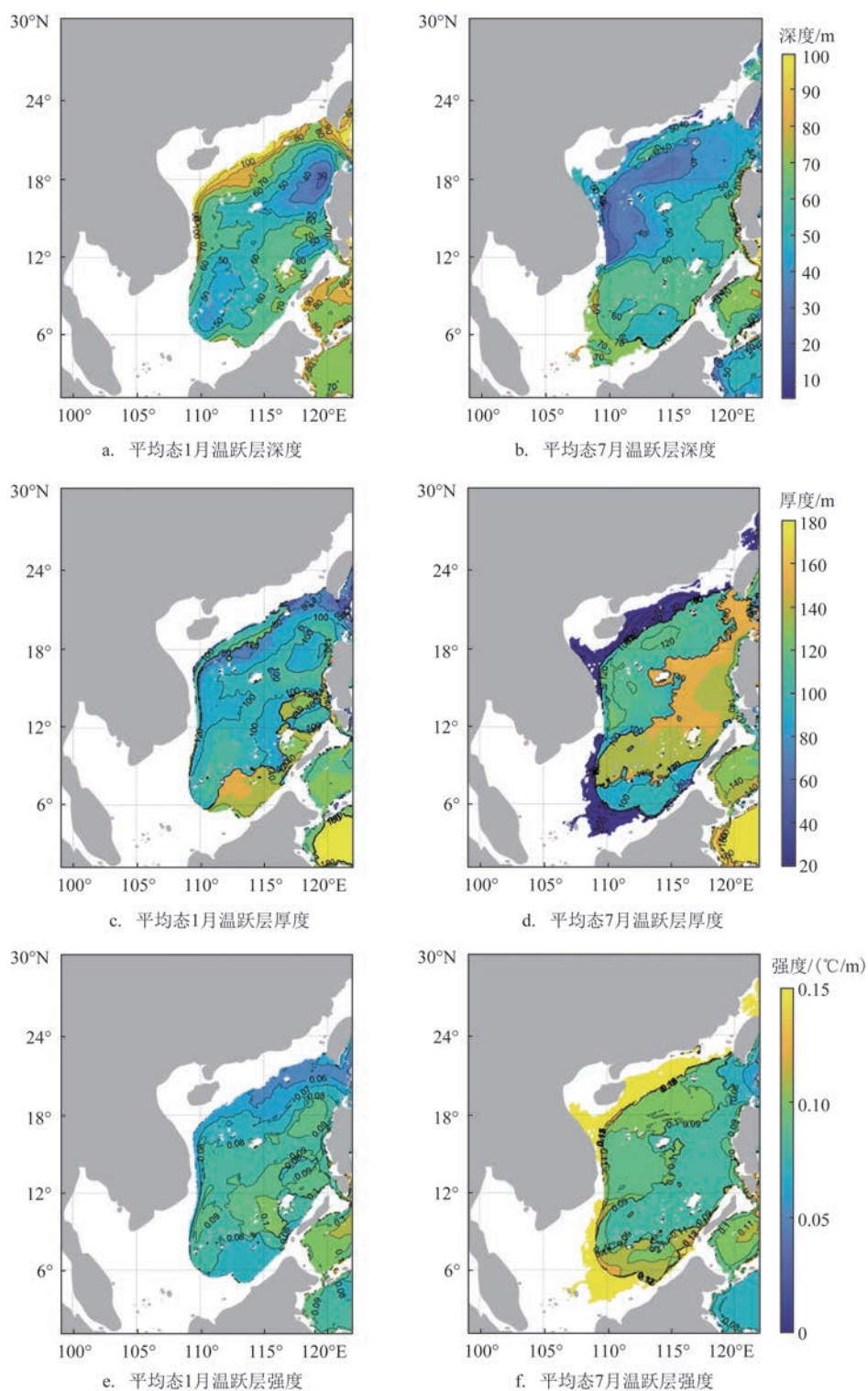


图3 同图2,但是为HYCOM再分析数据产品

Fig.3 The same as Figure 2 but for the HYCOM reanalysis dataset

海北部( $105^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ ,  $17^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ )的温度锋概率空间分布。从图中可以看出, OCEAN\_SCS数据集

算的温度锋出现频率空间分布同样表现出明显的季节变化特征。冬季, 温度锋出现区域分布在整个



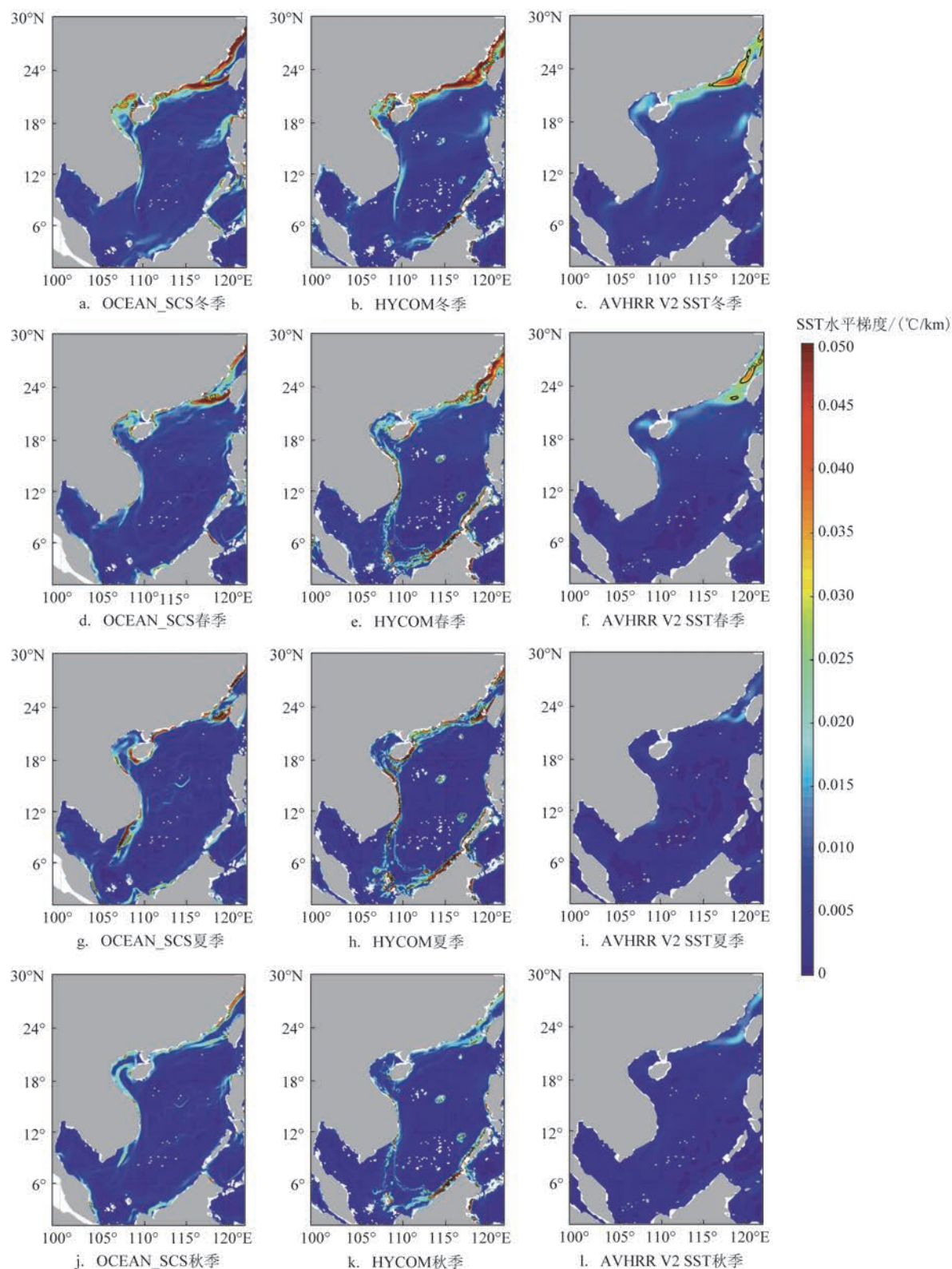


图4 基于OCEAN\_SCS数据集、HYCOM再分析数据产品多年季节平均态和AVHRR V2 SST数据集计算的4个季节的SST水平梯度及锋区分布

Fig.4 Climatological spatial distributions of Oceanic Zones and horizontal gradients of SST in four seasons based the OCEAN\_SCS dataset, the HYCOM reanalysis dataset and the AVHRR V2 SST dataset

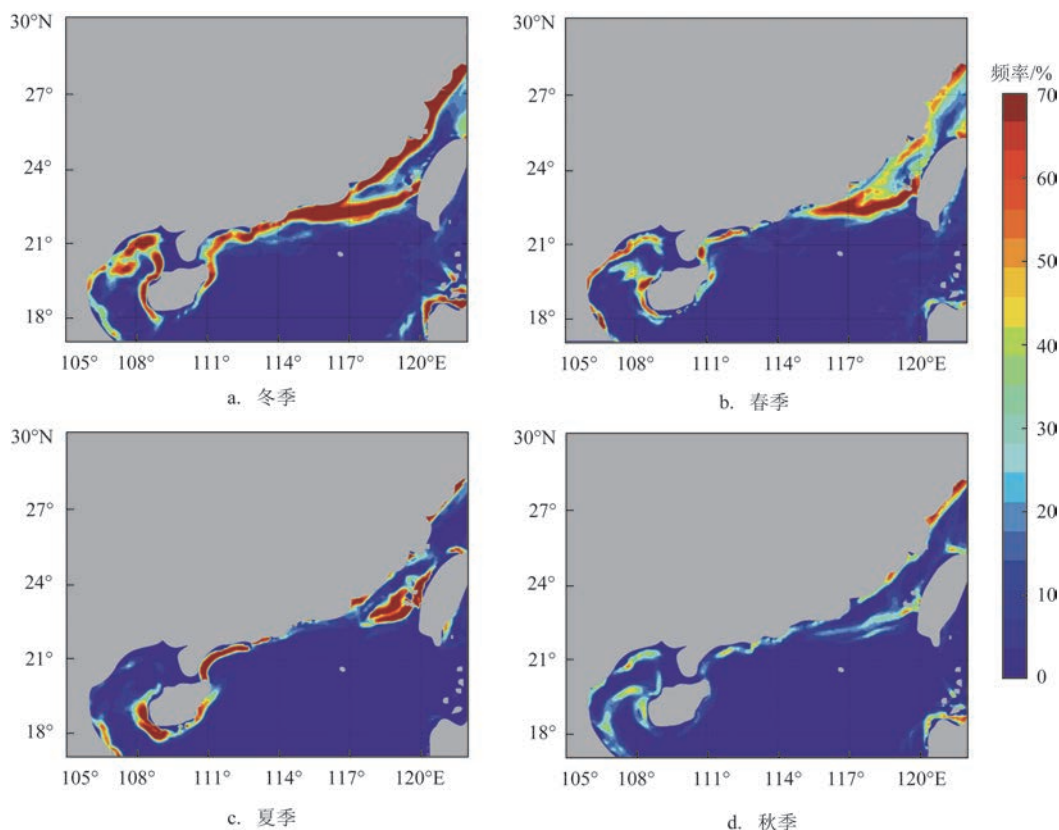


图5 基于OCEAN\_SCS数据集月平均态计算的4个季节温度锋出现频率空间分布

Fig.5 Climatological spatial distribution of the seasonal thermal frontal probability in four seasons based on the OCEAN\_SCS dataset

南海北部沿岸,且出现频率较高,近岸区域的温度锋出现频率超过70%(见图5a);夏季,温度锋出现的区域主要集中于粤西和海南岛沿岸以及台湾岛西部海域,出现频率较冬季低(见图5c);春秋季为季风转换区,其中春季温度锋出现频率分布与冬季相似,但量值小于冬季,秋季温度锋出现频率最小(见图5b、5d)。该结果表明,基于OCEAN\_SCS数据集计算的温度锋频率时空分布与前人基于卫星观测SST计算的结果十分相似<sup>[7,37]</sup>,OCEAN\_SCS数据集对南海温度锋的模拟效果较好。

## 2.3 中尺度涡评估

### 2.3.1 评估方法

海洋中尺度涡的生成、运动和消亡是海洋最复杂的动力过程之一,相关物理机制目前尚未完全清楚。在缺少资料同化的条件下,现有的数值模式对海洋中的中尺度涡个例还不能作出准确的模拟。

因此,本研究针对南海中尺度涡的统计性评估,即通过统计一段时间内南海中尺度涡的个数、生命长度、半径、相对涡度、旋转速度、移动速度和海表涡动能等,验证OCEAN\_SCS数据集对南海中尺度涡的模拟效果。评估对比参考的对象为HYCOM再分析数据产品和哥白尼海洋服务中心(Copernicus Marine Service)提供的包括多卫星融合的海表高度异常(Sea Level Anomaly, SLA)网格化数据(空间分辨率为 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ ),时间分辨率都是1 d,评估区域为 $99^\circ \sim 122^\circ \text{E}$ ,  $1^\circ \sim 30^\circ \text{N}$ ,评估时段为2007—2016年共10 a。

中尺度涡的探测方法为:首先,将OCEAN\_SCS数据集或HYCOM再分析数据产品的日平均SSH减去对应月的多年月平均SSH,得到各自的日平均SLA场;接着,将各自的日平均SLA场插值到 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ 的网格中,并利用地转流计算公式算出各自的地转流场。计算方法如下:



$$u = -\frac{g}{f} \frac{\partial(\text{SLA})}{\partial y} \quad (3)$$

$$v = \frac{g}{f} \frac{\partial(\text{SLA})}{\partial x} \quad (4)$$

式中:  $g$  表示重力加速度;  $f$  表示科氏参数;  $x$  和  $y$  分别表示经向和纬向方向坐标。最后, 将 OKUBO-WEISS (OW) 方法<sup>[39]</sup>分别应用到 OCEAN\_SCS 数据集或 HYCOM 再分析数据产品中, 探测各自的中尺度涡信息。OW 方法首先定义一个判别参数  $W$ <sup>[40-41]</sup>:

$$W = 4 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (5)$$

式中:  $u$  和  $v$  分别代表地转流场的东西和南北分量。接着将参数  $W$  小于  $2e \times 10^{-12}/s^2$  的区域定义为涡旋区域<sup>[42]</sup>。最后, 将不符合如下参数范围的涡旋剔除: 涡旋半径范围为 30~400 km; 涡旋振幅不小于 0.02 m; 涡旋生命长度不短于 5 d。

### 2.3.2 评估结果

表 1 为基于 OCEAN\_SCS 数据集、HYCOM 再分析数据产品和卫星观测 SLA 数据产品识别的南海涡旋相关参数对比。这其中, 基于 OCEAN\_SCS 数据集识别出了 1 240 个涡旋, 包括气旋涡和反气旋涡各 620 个; 基于 HYCOM 再分析数据产品识别出了 1 315 个涡旋, 包括 748 个气旋涡和 567 个反气旋涡。两套数据产品的气旋涡与反气旋涡个数相当, 这与林鹏飞等<sup>[43]</sup>和 CHEN 等<sup>[44]</sup>的结论一致。基于卫星观测 SLA 数据产品识别出的涡旋数量(1 720 个)明显大于基于 OCEAN\_SCS 数据集识别出的涡

旋数量, 而其涡旋的平均生命长度(25.4 d)小于基于 OCEAN\_SCS 数据集识别出的涡旋(28.9 d)。因此可以看出, 相对于卫星观测, OCEAN\_SCS 数据集模拟的中尺度涡生命周期更长, 个数更少, 这可能是由于用于构建 OCEAN\_SCS 数据集的数值模式对中尺度涡的耗散机制模拟不够准确, 其模拟的中尺度涡难以耗散。另一方面, OCEAN\_SCS 模拟的海表涡动能( $1.81 \times 10^9 \text{ m}^4/s^2$ )与 HYCOM 再分析数据产品的海表涡动能( $0.97 \times 10^9 \text{ m}^4/s^2$ )明显大于卫星观测 SLA 数据产品模拟的海表涡动能( $0.56 \times 10^9 \text{ m}^4/s^2$ ), 这主要是由于卫星观测 SLA 数据产品的水平分辨率较低, 其 SLA 较为平滑。OCEAN\_SCS 数据集与 HYCOM 再分析数据产品模拟的涡旋半径也稍大于卫星观测 SLA 数据产品识别的涡旋半径。除此之外, 3 种数据在中尺度涡相对涡度、旋转速度和移动速度等方面的模拟结果都较为接近(见表 1)。图 6 为 3 种数据探测的涡旋各参量的分布图, 从图中可以看出, 相较 OCEAN\_SCS 数据集, 基于 HYCOM 再分析数据产品探测的涡旋各参数(除相对涡度)都更贴近于卫星观测, 这主要得益于 HYCOM 再分析数据产品同化了卫星高度计观测数据; 而 OCEAN\_SCS 数据集探测的涡旋相对涡度分布优于 HYCOM 再分析数据产品, 其他参量的分布则与之相当。

## 3 结论

本文基于 ROMS 模式构建了一套覆盖南海区

表 1 OCEAN\_SCS 数据集、HYCOM 再分析数据产品和卫星观测资料探测的 2007—2016 年间中尺度涡参数对比  
Tab.1 The comparison of mesoscale eddy parameters during 2007—2016 from the OCEAN\_SCS dataset, the HYCOM reanalysis dataset and satellite observations

参数平均值	总涡旋 (OCEAN_SCS/HYCOM/观测)	气旋涡 (OCEAN_SCS/HYCOM/观测)	反气旋涡 (OCEAN_SCS/HYCOM/观测)
个数	1 240/1 315/1 720	620/748/898	620/567/822
生命长度/d	28.9/22.0/25.4	28.4/26.9/26.2	29.3/17.0/24.5
半径/km	81.2/73.0/68.2	79.2/70.5/67.3	83.2/75.4/69.1
相对涡度/( $10^{-6}/s$ )	—	8.9/9.5/8.9	-8.9/-7.6/-8.6
旋转速度/(m/s)	0.43/0.36/0.36	0.39/0.37/0.34	0.47/0.34/0.39
移动速度/(m/s)	0.15/0.21/0.12	0.15/0.21/0.12	0.16/0.21/0.12
海表涡动能/( $10^9 \text{ m}^4/s^2$ )	1.81/0.97/0.56	1.56/1.12/0.85	2.06/0.81/0.86

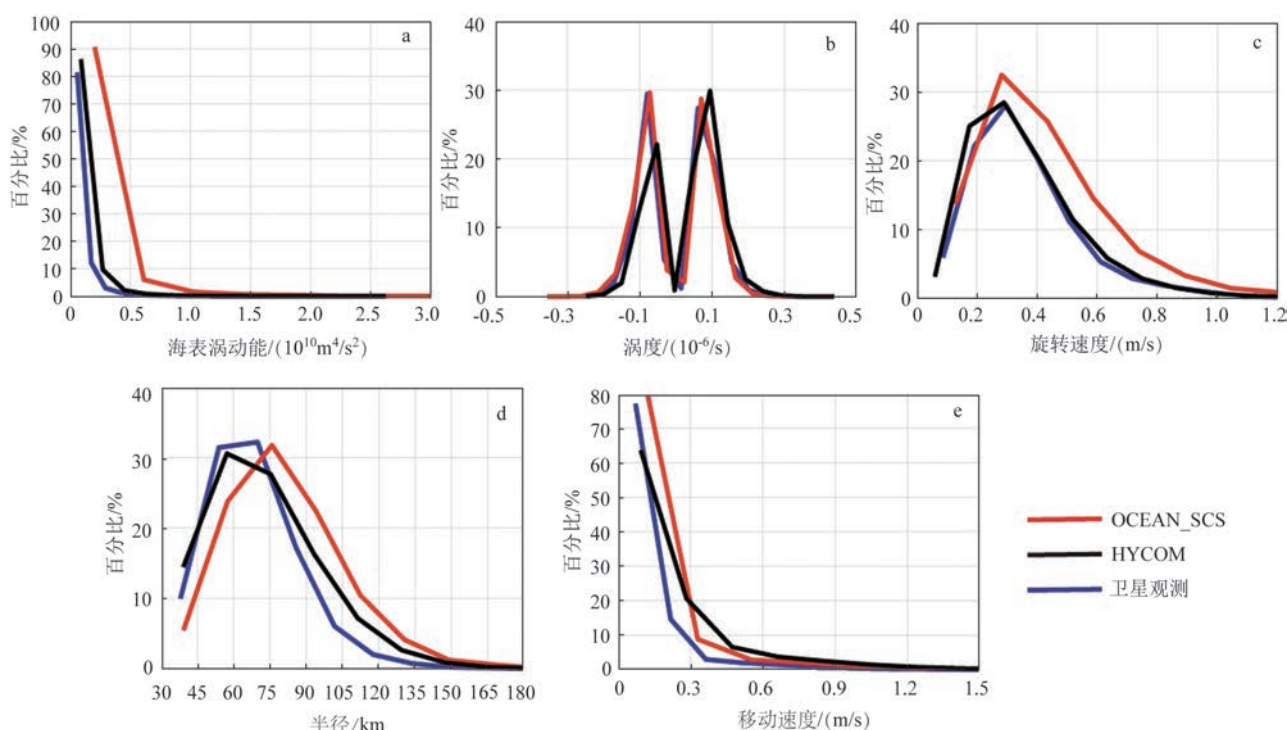


图6 OCEAN\_SCS数据集、HYCOM再分析数据产品和卫星观测资料探测的2007—2016年间南海中尺度涡海表涡动能(a)、涡度(b)、旋转速度(c)、半径(d)和移动速度(e)对比

Fig.6 The comparison of the sea surface eddy kinetic energy (a), vorticity (b), rotational speed (c), radius (d) and propagation speed (e) of mesoscale eddies in the SCS during 2007—2016 from the OCEAN\_SCS dataset, the HYCOM reanalysis dataset and satellite observations

域 40 a 涡分辨率的逐时温盐流数值产品 OCEAN\_SCS, 并利用独立观测资料、HYCOM 再分析数据产品和前人的研究成果对比评估了 OCEAN\_SCS 数据集对南海区域海洋现象要素(包括温跃层、温度锋和中尺度涡)的模拟效果。

从南海季节性温跃层参数(包括温跃层深度、厚度和强度)的对比结果可以看出, OCEAN\_SCS 数据集模拟的南海季节性温跃层深度不论是量值还是时空分布都与前人基于观测数据计算的结果十分吻合; 对于南海季节性温跃层厚度, OCEAN\_SCS 数据集的模拟结果与前人的模式模拟结果在时空分布形态上相似, 但量值偏小。OCEAN\_SCS 数据集模拟的南海季节性温跃层强度时空分布形态也与人前的模式模拟结果相似。HYCOM 再分析数据产品计算的季节性温跃层各参量在空间分布上与 OCEAN\_SCS 数据集的计算结果也较为一致, 但其温跃层深度和厚度量值稍大于 OCEAN\_SCS 数据集的计算结果。

与基于 HYCOM 再分析数据产品计算的 SST 水平梯度相比, 基于 OCEAN\_SCS 数据集的计算结果的空间分布和量值都极为相似。考虑到 HYCOM 再分析数据产品同化了包括卫星和现场观测的 SST 数据, 因此, 该结果表明 OCEAN\_SCS 数据集对南海温度锋空间分布和量值的模拟精度较高。与基于 OCEAN\_SCS 数据集计算的 SST 水平梯度相比, 基于 AVHRR V2 数据产品计算结果的分布与之相似, 但量值明显更小, 这可能是由于 AVHRR V2 数据产品水平分辨率( $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ )较低, 其 SST 的水平分布较为平滑。从月平均温度锋的出现频率空间分布图可以看出, OCEAN\_SCS 数据集模拟的温度锋表现出明显的季节变化特征, 其在冬夏季风盛行季出现的频率较高, 分布范围较广, 而在春秋季节风转换季出现的频率较低, 分布范围主要集中于近岸海域。这种时空分布特征与前人基于卫星观测 SST 数据产品计算的结果也十分相似。

对 OCEAN\_SCS 数据集模拟的南海中尺度涡

的评估主要为统计性的,评估参考的对象为基于HYCOM再分析数据产品和卫星观测SLA数据产品识别的中尺度涡。评估结果表明,OCEAN\_SCS数据集模拟的南海中尺度涡在数量上明显小于基于卫星观测SLA数据产品识别的中尺度涡,而在涡旋的平均生命长度上则大于后者。这可能是由于OCEAN\_SCS数据集构建所用的数值模式对中尺度涡的耗散机制模拟不够准确,其模拟的中尺度涡难以耗散。此外,在涡旋的半径和海表涡动能的模拟上,OCEAN\_SCS数据集的模拟结果都偏大,但两套资料在涡旋相对涡度、旋转速度和移动速度等方面的对比都比较接近。由于HYCOM再分析数据产品同化了卫星高度计资料,因此其在涡旋各参量(除相对涡度)分布的模拟上更接近卫星观测结果,而OCEAN\_SCS数据集探测的涡旋各参量分布也与之相当。

通过以上评估结果可以看出,OCEAN\_SCS数据集总体对南海季节性温跃层、温度锋和中尺度涡的模拟效果较好,与前人的研究成果和国际主流HYCOM再分析数据产品的计算结果也较为相符,仅在中尺度涡数量、生命周期、半径和海表涡动能的模拟上与观测稍有偏差。中尺度涡的准确模拟对于现有海洋模式仍是一个不小的挑战,在没有资料同化的前提下,目前的模拟结果也是可以接受的。另一方面,本文的评估对象主要是OCEAN\_SCS数据集模拟的海洋现象要素的气候月平均态,因此,本文的评估结果仅反映了OCEAN\_SCS数据集对气候态尺度的海洋现象要素的模拟精度。在未来的工作中,我们将收集更多的观测,进一步评估OCEAN\_SCS数据集对特定时刻海洋现象要素时空分布与变化的模拟精度。本文的研究结果表明OCEAN\_SCS数据集基本能够为进一步研究南海季节性温跃层、温度锋和中尺度涡的消长变化规律等提供数据支撑,可用于更全面地研究南海的海洋环境特征,服务于南海海洋环境保障工作。

**致谢:**感谢南海海洋研究所的高性能计算中心为本文数值模拟提供的技术支持。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 周燕遐,范振华,颜文彬,等.南海海域BT资料、南森站资料计算温跃层——三项示性特征的比较[J].海洋通报,2004,23(1):22-26.
- [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.
- [5] 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.
- [6] FANG G H, CHEN H Y, WEI Z X, et al. Trends and interannual variability of the South China Sea surface winds, surface height, and surface temperature in the recent decade[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006, 111(C11): C11S16.
- [7] JING Z Y, QI Y Q, 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.
- [8] BARTH J A, MENGE B A, LUBCHENCO J, et al. Delayed upwelling alters nearshore coastal ocean ecosystems in the northern California current[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(10): 3719-3724.
- [9] WANG Z Y, ZHAI F G, LI P L. A shift in the upperocean temperature trends in the South China Sea since the late 1990s[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(11): 44-51.
- [10] 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.
- [11] 管秉贤,袁耀初.中国近海及其附近海域若干涡旋研究综述 I. 南海和台湾以东海域[J].海洋学报,2006,28(3):1-16.
- [12] 王桂华,苏纪兰,齐义泉.南海中尺度涡研究进展[J].地球科学



- 进展, 2005, 20(8): 882-886.
- WANG G H, SU J L, QI Y Q. Advances in studying mesoscale eddies in South China Sea[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(8): 882-886.
- [13] CARTON J A, CHEPURIN G, CAO X H, et al. A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950-95. Part I: methodology[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30(2): 294-309.
- [14] CARTON J A, CHEPURIN G, CAO X H. A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950-95. Part II: results[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30(2): 311-326.
- [15] CUMMINGS J A, SMEDSTAD O M. Variational data assimilation for the global ocean[M]//PARK S K, XU L. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II)*. Berlin: Springer, 2013: 303-343.
- [16] HAN G J, LI W, ZHANG X F, et al. A regional ocean reanalysis system for coastal waters of China and adjacent seas[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(3): 682-690.
- [17] HAN G J, FU H L, ZHANG X F, et al. A global ocean reanalysis product in the China ocean reanalysis (CORA) project[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, 30(6): 1621-1631.
- [18] ZENG X Z, PENG S Q, LI Z J, et al. A reanalysis dataset of the South China Sea[J]. *Scientific Data*, 2014, 1: 140052.
- [19] 谢波涛, 尹汉军, 朱宇航, 等. 南海温盐流数值产品构建及评估[J]. *热带气象学报*, 2022, 38(4): 529-540.
- XIE B T, YIN H J, ZHU Y H, et al. The generation and assessment of temperature-salinity-current numerical dataset in the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2022, 38(4): 529-540.
- [20] SHCHEPETKIN A F, MCWILLIAMS J C. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C3): 3090.
- [21] SHCHEPETKIN A F, MCWILLIAMS J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. *Ocean Modelling*, 2005, 9(4): 347-404.
- [22] DEBREU L, MARCHESIELLO P, PENVEN P, et al. Two way nesting in split-explicit ocean models: algorithms, implementation and validation[J]. *Ocean Modelling*, 2012, 49-50: 1-21.
- [23] PENVEN P, DEBREU L, MARCHESIELLO P, et al. Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding procedure to the central California upwelling system[J]. *Ocean Modelling*, 2006, 12(1-2): 157-187.
- [24] OLSON C J, BECKER J J, SANDWELL D T. A new global bathymetry map at 15 arcsecond resolution for resolving seafloor fabric: SRTM15\_PLUS[C]//AGU Fall Meeting Abstracts 2014. San Francisco: AGU, 2014.
- [25] LARGE W G, MCWILLIAMS J C, DONEY S C. Oceanic vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization[J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32(4): 363-403.
- [26] CARTON J A, CHEPURIN G A, CHEN L G. SODA3: a new ocean climate reanalysis[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(17): 6967-6983.
- [27] CARTON J A, CHEPURIN G A, CHEN L G, et al. Improved global net surface heat flux[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(5): 3144-3163.
- [28] CARTON J A, PENNY S G, KALNAY E. Temperature and salinity variability in the SODA3, ECCO4r3, and ORAS5 ocean reanalyses, 1993-2015[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(8): 2277-2293.
- [29] ERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present[EB/OL]. (2018-06-14) [2022-08-30]. <https://dx.doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>.
- [30] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. *Monthly Weather Review*, 1980, 108(8): 1212-1218.
- [31] LARGE W G, POND S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(3): 324-336.
- [32] PENG S Q, LI Y N. A parabolic model of drag coefficient for storm surge simulation in the South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15496.
- [33] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(2): 183-204.
- [34] 姜波, 吴新荣, 丁杰, 等. 南海温跃层深度计算方法的比较[J]. *海洋通报*, 2016, 35(1): 64-73.
- JIANG B, WU X R, DING J, et al. Comparison on the methods of determining the depths of thermocline in the South China Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 2016, 35(1): 64-73.
- [35] 郝佳佳, 陈永利, 王凡. 中国近海温跃层判定方法的研究[J]. *海洋科学*, 2008, 32(12): 17-24.
- HAO J J, CHEN Y L, WANG F. A study of thermocline calculations in the China sea[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(12): 17-24.
- [36] MOORE J K, ABBOTT M R, RICHMAN J G. Location and dynamics of the Antarctic polar front from satellite sea surface temperature data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C2): 3059-3073.
- [37] WANG D X, LIU Y, QI Y Q, 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.
- [38] PARK K A, CHUNG J Y, KIM K. Sea surface temperature fronts in the East (Japan) Sea and temporal variations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(7): L07304.

- [39] CHELTON D B, SCHLAX M G, SAMELSON R M, et al. Global observations of large oceanic eddies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(15): L15606.
- [40] ISERN-FONTANET J, GARCÍA-LADONA E, FONT J. Identification of marine eddies from Altimetric maps[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(5): 772-778.
- [41] ISERN-FONTANET J, GARCÍA-LADONA E, FONT J. Vortices of the Mediterranean Sea: an altimetric perspective[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36(1): 87-103.
- [42] CHAIGNEAU A, LE TEXIER M, ELDIN G, et al. Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern south Pacific Ocean: a composite analysis from altimetry and Argo profiling floats[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C11): C11025.
- [43] 林鹏飞, 王凡, 陈永利, 等. 南海中尺度涡的时空变化规律 I. 统计特征分析[J]. *海洋学报*, 2007, 29(3): 14-22.
- LIN P F, WANG F, CHEN Y L, et al. Temporal and spatial variation characteristics on eddies in the South China Sea I. Statistical analyses[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(3): 14-22.
- [44] CHEN G X, HOU Y J, CHU X Q. Mesoscale eddies in the South China Sea: mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C6): C06018.

## The assessment of thermocline, thermal front and mesoscale eddy in the temperature-salinity-current numerical dataset of the South China Sea

YIN Hanjun<sup>1</sup>, XIE Botao<sup>1</sup>, HUANG Bigui<sup>1</sup>, ZHU Yuhang<sup>2,3\*</sup>, PENG Shiqiu<sup>2,3,4</sup>, LI Yineng<sup>2</sup>, CHENG Gaolei<sup>2</sup>

(1. China National Offshore Oil Corporation General Research Institute, Beijing 100027, China; 2. State Key Laboratory of Tropical Oceanography (South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), Guangzhou 510301, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Marine Disaster in the Beibu Gulf, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China; 4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China)

**Abstract:** A 40-year temperature-salinity-current numerical dataset of the South China Sea (SCS), namely OCEAN\_SCS, has been generated based on the Regional Ocean Model System (ROMS). Data from independent observations and previous literatures are used to assess the thermocline, thermal front and mesoscale eddy in the OCEAN\_SCS. The results show that the OCEAN\_SCS has a good performance on simulating the thermocline, thermal front and mesoscale eddy in the SCS, and the simulation is generally consistent with previous studies and the HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) reanalysis data. Minor biases between the simulation and observation only exist in the number, life cycle, radius and sea surface eddy kinetic energy of mesoscale eddy, which is known as the common bottleneck of mesoscale eddy numerical modeling. The results also suggest that the OCEAN\_SCS dataset is reliable to support further researches on the generation, dissipation and variation of the thermocline, thermal front and mesoscale eddy in the SCS, and to support comprehensive researches on the oceanic environmental protection in the SCS.

**Key words:** South China Sea; numerical ocean dataset; thermocline; thermal front; mesoscale eddy