

张梦莉, 张春玲, 范家慧, 等. 基于梯度依赖最优插值的黑潮-亲潮交汇区中尺度涡实时内部结构构建试验[J]. 海洋学报, 2024, 46(10): 1-12, doi:10.12284/hyxb2024105

Zhang Mengli, Zhang Chunling, Fan Jiahui, et al. Real-time internal structure construction of mesoscale eddy based on gradient-dependent OI method in the Kuroshio-Oyashio confluence region[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(10): 1-12, doi:10.12284/hyxb2024105

基于梯度依赖最优插值的黑潮-亲潮交汇区 中尺度涡实时内部结构构建试验

张梦莉¹, 张春玲^{1,2*}, 范家慧¹, 闫子维¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室, 上海 200125)

摘要: 伴随涡旋演变运动的内部水体结构的实时变化, 一直是深入研究中尺度涡生态效应的重要影响因素之一。本文以黑潮-亲潮交汇区的 3 个涡旋为例, 基于卫星高度计与 Argo 剖面资料, 利用梯度依赖最优插值方法进行了涡旋实时内部结构的构建试验, 并通过与卫星观测、现场调查, 以及数值模拟等数据的对比验证, 系统评估了该方法在构建涡旋实时结构的可靠性和有效性。结果表明, 基于构建结果计算的 3 个涡旋表层地转流的速度量级与卫星观测的速度量级相一致; 基于构建结果计算的地转流与 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 实测数据相比, 发现涡心位置与 ADCP 观测的速度转向位置一致; 构建结果等密度线的起伏形状和振幅均与对应的 XCTD (Expendable Conductivity-Temperature-Depth, XCTD) 现场观测相吻合; 此外, 数值模式数据与构建得到的涡心和涡旋平均半径基本一致。故, 梯度依赖最优插值方法是一种很有希望表示涡演化过程中实时内部特征的技术。

关键词: 实时演变; 中尺度涡; 梯度依赖最优插值; 内部结构

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)10-0001-12

1 引言

以长期封闭环流为主要特征的中尺度涡运动, 在黑潮-亲潮交汇区普遍存在, 其较强的涡动能对该海域的海水混合和物质输运均起到决定性作用。中尺度涡内部垂直环流通过涡动混合和抽吸作用决定着局地环境要素的垂直结构和跃层分布^[1], 且气旋涡与反气旋涡引起的温度跃层和盐度跃层垂向位置的变化各不相同^[2-3], 因此, 黑潮-亲潮交汇区中尺度涡的内部结构也因为生成机制、时空尺度、运动特征等的差异而各不相同。何忠杰^[4]基于三维流场的再分析结果, 对 3 个气旋涡和 3 个反气旋涡流场结构的研

究表明, 气旋涡主要呈圆柱形, 通常能达到几百米, 而反气旋涡多呈圆锥形且深度较深, 平均深度可达 1 000 至 2 000 m。由于垂向水团的分布, 有些反气旋涡的盐度异常结构表现出明显的三明治形状, 同时因为西北太平洋主温跃层中存在模态水, 一些气旋涡的温度异常结构呈现出双核垂向结构^[5]。不同涡旋结构所形成的局地水体结构, 以及引起的物质体积输运均具有较大差异, 这将直接决定着涡旋演变过程中的局地温盐性质, 以及初级生产力的再分配^[6-7]。因此, 全面了解黑潮-亲潮交汇区中尺度涡内部结构的实时演变, 对涡旋生态动力效应的深入研究, 以及维持该海域生态系统稳定具有重要的指导意义。

收稿日期: 2024-05-15; 修订日期: 2024-08-13。

基金项目: 国家自然科学基金 (42106090); 农业农村部大洋渔业可持续利用重点实验室开放基金 (A1-2006-23-200202)。

作者简介: 张梦莉 (1999—), 女, 河南省商丘市人, 主要从事中尺度涡旋研究。E-mail: zml51679600@126.com

* 通信作者: 张春玲, 女, 山东省德州市人, 主要从事海洋动力学研究。E-mail: clzhang@shou.edu.cn

近年来,随着人们对海洋监测能力的不断提升,中尺度涡旋的三维结构成为国内外学者们关注的热点之一。前人综合卫星观测、Argo剖面、现场观测等多种数据,通过复合分析^[8-10]、区域合成^[11]、数值模拟^[12]等方法,给出了不同时空背景下,涡旋内部结构的统计模型。例如,Chaigneau等^[8]结合卫星测高和Argo剖面数据,构建了南太平洋东部中尺度涡的平均垂直结构,结果显示,该海域气旋涡和反气旋涡的核心分别在约150 m和约400 m深度处。Sun等^[13]研究了黑潮延伸带中涡旋的复合三维结构,发现复合气旋涡和反气旋涡的三维结构均为子弹形,影响深度达800 m。然而,上述研究只解析了特定海域涡旋的复合平均结构,并没有阐述中尺度涡的全球统一结构特征。张正光^[11]使用区域合成分析方法,基于卫星高度计和Argo剖面资料,给出了中尺度涡统一的水平结构以及垂直结构模型,并在此基础上构建了中尺度涡的三维结构。随着运算能力的大幅度提升,使用数值模型来模拟涡旋三维结构的方法迅速发展。Lin等^[12]基于ROMS(Regional Ocean Modeling System, ROMS)海洋模式构建了南海中尺度涡旋的三维结构,结果表明,在南海海域,存在碗形、透镜形、锥形等3种类型的涡旋。前人的一系列研究成果,为我们深入了解涡旋的内部结构特征提供了必要的技术手段。由于涡旋区连续观测数据的欠缺,以及数值模式空间分辨率和同化数据的不足,目前多数研究仍集中在融合多源历史观测资料,解析涡旋区多年平均的三维结构,伴随中尺度涡运动过程中内部结构的实时演变特征仍不明朗。因此,有必要借助于客观分析技术,将观测资料与中尺度涡复合结构进行融合,实时、实地再现涡旋内部结构的变化过程。

作为一种数据同化技术发展起来的梯度依赖最优插值方法,简称梯度依赖OI(Gradient-dependent Optimal interpolation)^[14],可以根据海洋运动的水平梯度变化规律,自动调整客观分析的相关尺度,与传统数据同化方法^[15-17]相比,能够更充分地提取观测资料中的中尺度信息,且该方法在点对点构建局地温盐垂直结构方面的有效性已得到证实^[18],这为构建中尺度涡演变运动过程中,不同涡旋区域的垂直结构提供了有利手段。本文拟以黑潮-亲潮交汇区3个涡旋为例,综合利用2001-2022年间的卫星高度计数据和Argo剖面资料,在合成分析涡旋区平均结构的基础上,利用梯度依赖OI方法,基于Argo和XCTD航次调查数据,进行涡旋不同演变阶段内部结构的实时构建试验,并将构建结果与卫星观测数据、现场观测数

据以及数值模式数据进行对比,系统验证该方法在构建涡旋实时结构方面的有效性,为深入研究该海域中尺度过程的精细化结构特征奠定基础。

2 数据介绍

2.1 卫星高度计数据

中尺度涡表面特征参数借助于卫星高度计观测到的海表面高度异常和海表流场数据进行识别探测。卫星数据采用哥白尼海洋服务中心(<http://marine.copernicus.eu/>)提供的海表面高度异常及其衍生的地转流异常数据(产品ID为SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047)。该产品时间分辨率包括天与月,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,覆盖时间长度为1993年1月至2023年7月。本文选取2001年1月1日至2022年12月31日,22年间黑潮-亲潮交汇区($30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$)每天的海表面高度异常和流场,借助于流矢量方法^[19]获得每天一个记录的涡旋表面参数,包括涡旋类型、涡心位置、涡旋边界、平均半径等。

2.2 Argo剖面观测资料

中尺度涡背景场的区域合成,以及涡旋实时三维结构的构建,主要依赖于长时间序列的Argo剖面观测。与涡旋区同期的Argo剖面资料由杭州全球海洋Argo系统野外科学观测研究站(<ftp://data.argo.org.cn/pub/ARGO/global/>)提供。这些Argo剖面经过了Argo野外站实时与部分延时质量控制,为了确保涡旋实时三维结构的构建精度,本文又统一进行了温盐范围检验、温盐梯度检验、温盐传感器漂移检验、冰点检验、毛刺信号检验等质量再控制^[20-21]。经过质量再控制,22年间涡旋运动合成区域内共有13 338条温、盐度观测剖面,其最大观测深度为2 000 m,这里以中尺度涡通常的影响深度为研究范围,选用这些剖面0~1 000 m范围内的观测资料,并通过Akima方法^[22],以5 m等间隔进行垂向插值。

2.3 航次调查数据

“崧航号”2022年在西北太平洋进行科学考察期间获得的XCTD现场观测数据,是专门针对黑潮-亲潮交汇区不同纬度、不同类型的中尺度涡进行的现场加密观测。此次观测分别在冷暖水混合区(约 40°N)和强流区(约 35°N)选取了两个暖涡和一个冷涡(图1a),以下分别简称AE-1、AE-2和CE-3,每个涡旋区均设置两条交叉断面,同时观测涡旋区的温度、盐度和流速。其中,AE-1内的XCTD观测剖面共10条,时间为2022年6月19-21日;AE-2内的XCTD观测剖面共12条,时间为2022年6月23-24日;CE-

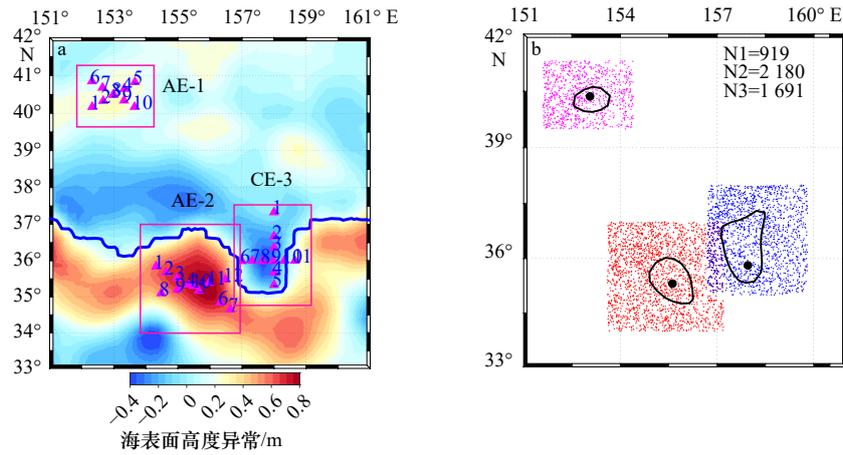


图1 2022年6月21日海表面高度异常(a)与合成区域内的Argo剖面分布(b)

Fig. 1 Sea level anomaly on June 21, 2022 (a) and locations of Argo profiles in daily composite regions (b)

紫色矩形为选取的3个涡旋个例; 紫色三角形为在AE-1、AE-2、CE-3涡旋内的XCTD观测站点; 蓝色曲线为黑潮流轴; 紫色(919个)、红色(2180个)以及蓝色(1691个)圆点分别表示3个合成区域内用于构建复合结构的Argo剖面; 黑色圆点为2022年6月21日3个涡旋个例的涡心位置; 黑色曲线为涡旋边界

The purple rectangle is three eddy cases; the purple triangle is the XCTD observations in the AE-1, AE-2, and CE-3; the blue curve is Kuroshio; the purple (919 profiles in AE-1), red (2180 profiles in AE-2), and blue (1691 profiles in AE-3) dots are the Argo observations for composing; the black dots are eddy centers of the three eddy cases on June 21, 2022; the black curve is the eddy edge

3内的XCTD观测剖面共11条, 时间为2022年7月2-3日。

本文以AE-1、AE-2和CE-3为例, 利用涡旋区的Argo剖面和部分XCTD观测构建3个涡旋的实时内部结构。AE-1选用编号为2、3、4、7、9的5个XCTD剖面; AE-2选用编号为2、4、6、9、10、11的6个XCTD剖面; CE-3选用编号为2、4、7、9、10的5个XCTD剖面。每个涡旋区其余的XCTD观测剖面, 及同步的ADCP海流观测数据用于构建结果的验证。其中, XCTD最大观测深度为2000m, 这里同样选用0~1000m范围内的观测数据, 并进行5m等间隔垂向插值。而调查期间的ADCP最大量程为256m, 其以16m等间隔分为15层, 第一层深度约为32m。

2.4 数值模式数据

用于验证中尺度涡实时内部结构的次表层流场数据来源于哥白尼海洋服务中心 (<http://marine.copernicus.eu/>), 该中心提供了全球海洋再分析产品(GLORYS12V1), 该产品为NEMO(Nucleus for European Modelling of the Ocean, NEMO)海洋数值模型的三维模拟结果, 包括0~5727.9m的温度、盐度、海流、海平面、混合层深度和海冰参数等要素, 时间分辨率有日平均和月平均两种, 空间分辨率为 $(1/12)^\circ$, 垂向分为不等间隔的50层。这里选用日平均0~1000m范围内的次表层流场数据来验证涡旋实时内部结构的构建结果。

3 构建方法

涡旋内部结构的实时构建包括中尺度涡背景场的合成、同化数据统计、实时结构构建等3个主要环节。其中, 背景场采用区域合成分析方法, 而实时分析场借助于梯度依赖OI方法加以构建。

3.1 背景结构区域合成

涡旋的背景结构采用归一化区域合成分析方法, 利用2001-2022年间的Argo剖面观测数据, 进行涡旋区数据匹配、时间标准化、空间合成分析^[4]。首先, 筛选3个涡旋合成区域内22年的Argo剖面。然后, 根据时空限制条件, 将涡旋与Argo剖面进行匹配: Argo观测时间在涡旋生成时间的前/后7d内; 观测剖面位置在与之匹配的涡旋3倍半径范围内。并将Argo观测投影到以涡心为原点的归一化坐标系上, 得到观测剖面相对于涡心的归一化距离。最后, 分别通过式(1)和式(2)~(4)计算涡旋径向结构和垂直结构, 进而由式(5)反演涡旋密度异常:

$$R\left(\frac{r}{R_0}\right) = \left[1 - \left(\frac{r}{R_0}\right)^2\right]^{1/2} e^{-\left(\frac{r}{R_0}\right)^2/2}, \quad (1)$$

$$H(z) = H_0 \cdot \sin(k \cdot z_s + \theta_0) + H_{ave}, \quad (2)$$

$$z_s = \int_0^z \frac{N(z)}{f} dz, \quad (3)$$

$$N(z) = \left[-\left(\frac{g}{\rho_0}\right) \frac{d\rho}{dz}\right]^{1/2}, \quad (4)$$

$$\rho' = -\rho_0 \cdot \eta_0 \cdot R \left(\frac{r}{R_0} \right) \cdot \frac{dH(z)}{dz}, \quad (5)$$

其中, R 为涡旋径向结构, r 与 R_0 分别为Argo观测离涡心的距离和涡旋半径。 H 为涡旋垂直结构; z 为水深; H_0 为涡心处的海表面高度; H_{ave} 为合成区域平均海表面高度; θ_0 为初相位; z_s 为去除背景层结而进行的拉伸坐标系变换; f 为科氏参数; N 为浮力频率; g 为重力常数; η_0 为涡心处的海表面高度异常、 ρ 是由Argo观测剖面计算的位势密度; ρ_0 是由WOA18数据计算的合成区域季节平均位势密度。

3.2 梯度依赖最优插值方法

涡旋内部实时结构的构建基于梯度依赖OI^[14, 23], 点对点地计算涡旋演变过程中, 涡旋区特定位置的温度、盐度垂直结构。其基本原理是利用观测资料对涡旋的背景结构进行实时订正, 即, 对于涡旋每天的影响半径范围内的任意位置, 其分析场 v_i^a 均为背景结构 v_i^b 与 M 个以最优权重 w_{ij} 加权的观测增量 δy_j^o 的和:

$$v_i^a = v_i^b + \sum_j^M w_{ij} \delta y_j^o, \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^M w_{ij} \mu_{jk} + \eta_k w_{ik} = \mu_{ik}, \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

v_i^a 为涡旋区任意位置点的分析值, v 可以是分析变量, 如温度或盐度。 v_i^b 是对应点上的涡旋背景结构, 即分析点的平均估计值。下标 i 表示涡旋区位置点的个数, j 和 k 表示分析点周围可利用的观测点。 y_j^o 为第 j 个观测站点的实际观测, 观测增量 $\delta y_j^o = y_j^o - H(v_i^b)$ 是通过双线性插值算子 H , 将背景值 v_i^b 转换为观测值 y_j^o 的初猜值。每个观测增量的最优权重 w_{ij} , 可通过求解线性方程组(7)来确定。其中, 参数 η_k 是观测误差相对于背景误差的平方, 通常设为常数, 在西北太平洋海域, 当 $\eta = 0.25$ 时, 对应的分析误差最小^[23]。背景误差协方差 μ_{jk} 和 μ_{ik} 分别为两个观测点 j 、 k 之间、分析点 i 和观测点 k 之间的背景误差相关系数。背景误差协方差遵循高斯指数函数分布, 且与距离成反比^[14, 18, 24], 相关尺度 L_∞/G 依赖于涡旋区分析变量的水平梯度变化规律:

$$\mu_{ik} \sim \exp \left[-\frac{(x_i - x_k)^2}{(L_\infty/G_x)^2} - \frac{(y_i - y_k)^2}{(L_\infty/G_y)^2} \right], \quad (8)$$

$$G_x = 1 + \frac{|\partial v / \partial x|}{E(|\partial v / \partial x|)}, G_y = 1 + \frac{|\partial v / \partial y|}{E(|\partial v / \partial y|)}. \quad (9)$$

x 和 y 分别为经度和纬度。 $L_\infty = L \cos \varphi$ 为相关尺度参数, 其中, 相关尺度常数 L 通常设为分析点空间间隔的3~5倍, φ 为分析点对应的纬度。经向梯度参

数 G_x 和纬向梯度参数 G_y , 由气候态数据计算得到, $|\partial v / \partial x|$, $|\partial v / \partial y|$ 分别为分析变量的经向和纬向绝对梯度, E 表示整个涡旋区求均值。

梯度依赖OI方法的分析效果对观测资料数量有一定依赖性, 有效半径(通常为析点空间间隔的10倍)范围内, 可利用的观测剖面超过5条将具有较好的分析效果^[18]。经统计, 图1中选取的3个涡区, 在每个涡旋演变过程中, 大部分天数的观测数量都满足要求, 每个涡旋发展期间的观测资料都在6个以上, 最多可达17个, 且观测数量与涡旋的平均半径大致呈成正比关系, AE-2的平均半径相对较大, 生命周期较长, 观测剖面数量也比其他两个涡旋多。

通过式(6)~(9)将可利用的观测数据实时同化, 即可获取涡旋区任意位置点的温、盐度实时剖面结构, 其基本原理如图2所示。自涡心至涡边界的最远点的连线上, 每隔5 km设置一个目标分析位置, 每个分析点周围, 以10倍间隔(50 km)为有效半径, 搜索分析点周围可利用的Argo和XCTD观测剖面。式(9)中的相关尺度常数 L 取值为25 km。由此构建了3个涡旋个例生命周期内每天的温度异常、密度异常以及盐度异常结构, 垂直范围为0~1 000 m, 垂向分辨率为5 m。值得指出的是, 本文仅在归一化坐标系中, 沿着涡旋内的一条直线进行了涡旋内部实时结构的构建实验, 每个涡旋, 每天的构建结果均为一个断面。

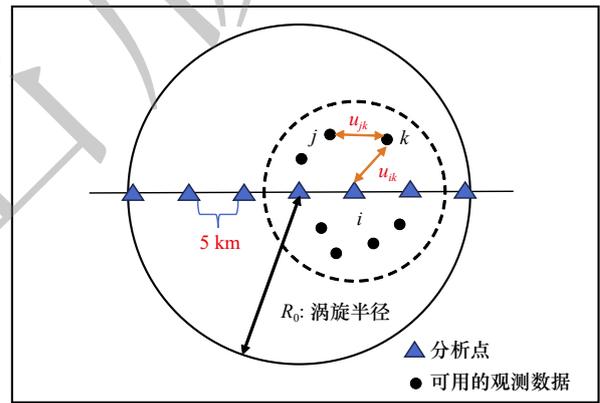


图2 梯度依赖OI原理

Fig. 2 Principle of gradient-dependent OI method

4 构建结果验证

4.1 与背景结构对比

由3.1节的区域合成分析得到的涡旋背景场, 是涡旋区的多年复合平均结构。图3将构建的3个涡旋实时结构与涡旋背景结构进行对比, 以展示实时结构与平均结构的整体一致性, 及其相对于背景结构的

内部特征演变。由图可见,两个暖涡的复合平均结构中,在涡心区域都存在明显的低密中心,距离涡心60 km以内,涡旋区密度明显低于同水层的周围海水,位于约40°N(35°N)的暖涡AE-1(AE-2),其复合结构的垂直影响深度约为400 m(800 m)(图3a1-a2);与AE-2以涡流对形式存在的冷涡CE-3,其复合结构的涡心区域则呈现出明显的高密特征,内部密度高于同水层的周围海水,垂直影响范围为800 m左右(图3a3)。3个涡旋的复合结构均呈子弹状,实时内部结构与其相比变化较大。随着深度的增加,AE-1的负密度异常在40~90 m处呈现先增大后减小的趋势,约60 m深度处达到最大值(-0.5 kg/m³);在AE-1发展、增强以及衰弱阶段,其负密度异常先增大后减小(图3b1-d1)。AE-2的暖核出现在300 m处,800 m以上呈现双核结

构,这与之前的研究一致^[5]。随着AE-2时间序列的演化,其负密度异常也呈现出先增大后减小的变化趋势(图3b2-d2)。AE-1和AE-2内部结构随时间的变化趋势是由于暖涡运动过程中,海表暖水下沉导致涡旋内部逐渐升温,负密度异常逐渐增大;而暖涡在衰减期间能量逐渐向周围耗散,负密度异常则逐渐减小。CE-3位于黑潮流轴区域(35°N),冷核在150~250 m之间。与背景结构(图3a3)相比,CE-3实时内部结构也呈子弹形状,不同的是实时结构反映了更多的小尺度或中尺度波动。在CE-3发展、增强以及衰减阶段,由于涡旋的旋转运动,深层冷水上升,冷核范围扩大,其同水层的正密度异常呈逐渐增大的变化特征(图3b3-d3)。通过观察3个涡旋的实时结构,发现3个涡旋均是垂直倾斜的,涡旋发展阶段的垂直倾斜随着

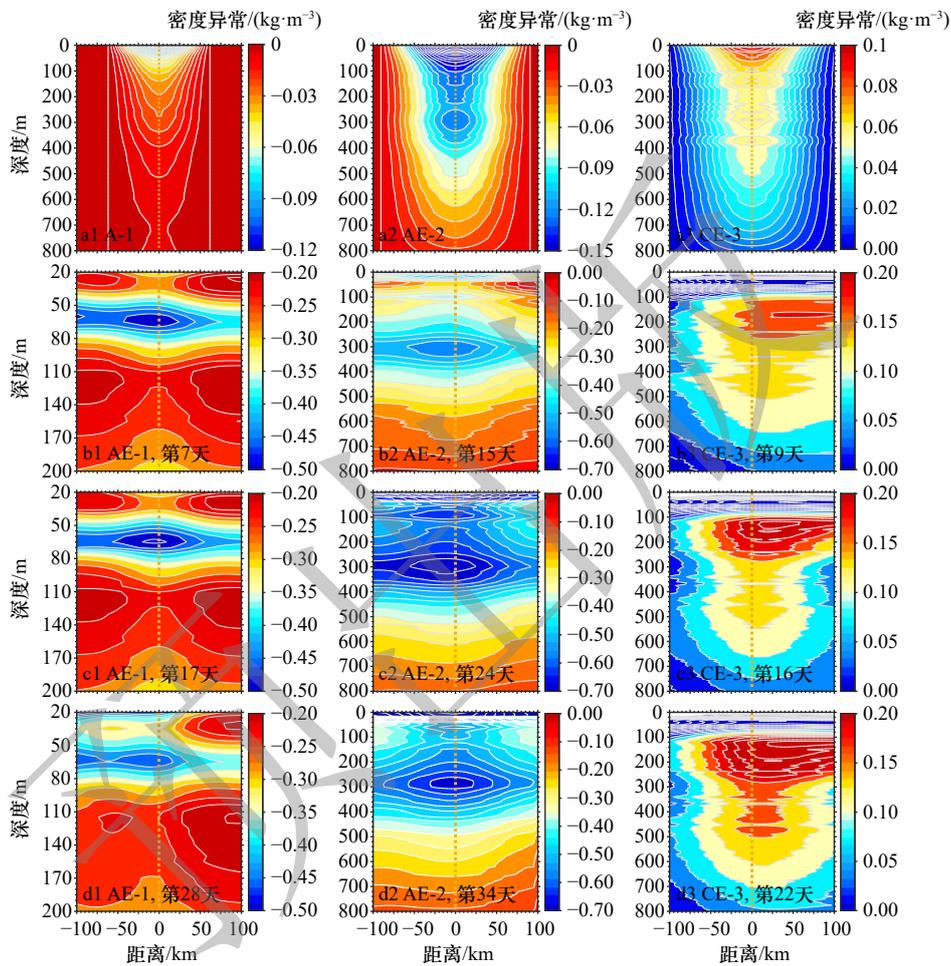


图3 涡旋背景结构与实时结构对比

Fig. 3 Comparison between background structure and real-time structure of eddy

a1-a3. 三个涡旋区复合位势密度异常断面; b1-d1. 反气旋涡1第7天、第17天和第28天的实时密度异常断面; b2-d2. 反气旋涡2第15天、第24天和第34天的实时密度异常断面; b3-d3. 气旋涡3第9天、第16天和第22天的实时密度异常断面; 黄色虚线为涡心位置

a1-a3. Background density anomaly sections of three eddy regions; b1-d1. the potential density anomaly on days 7, 17, and 28 of AE-1; b2-d2. the potential density anomaly on days 15, 24, and 34 of AE-2; b3-d3. the potential density anomaly on days 9, 16, and 22 of CE-3;

the yellow dot lines are the locations of the eddy centers

时间的增加而增加,这与Li等^[25]的研究基本一致。

4.2 卫星数据检验

根据构建的3个涡旋的实时温度、盐度和密度结构计算了地转流^[26],并与卫星观测流场进行比较。图4为沿构建断面的速度时间序列变化图,由图可见,反气旋涡表现出明显的顺时针闭合环流(气旋涡逆时针旋转)。涡核边缘的速度较大,而涡心处的速度相对较小。与AE-2和CE-3相比,AE-1的表面流速相对较小,这与卫星观测到的海表面流场一致。在涡旋发展阶段(AE-1的第1~7天,AE-2的第1~14天,CE-3的第1~6天),构建结果显示表面流速逐渐增强(图4a1~a3),而卫星观测结果也显示表面流速逐渐增加(图4b1~b3)。在稳定期(AE-1为第8~20天,AE-2为第15~25天,CE-3为第7~16天)和衰减期(AE-1为第21~28天,AE-2为第26~34天,CE-3为第17~22天)也存在不同的变化。这可能与所采用的“海表面”深度不同有关:构建结果采用5 m(常见的Argo首次观测深度)作为海表面,而卫星观测的海表面通常为0.1 m左右^[27]。即使存在稍微的不同,但构建的地转流的速度量级与卫星观测的速度量级相一致。

4.3 现场观测数据检验

基于构建的涡旋实时温度、盐度和密度结构,计算了3个涡旋的地转流^[26],并与ADCP观测流速进行比较(图5)。图5显示了构建结果在0~1 000 m深度范围内的地转流变化,以及ADCP最大观测深度(256 m)以上的流速变化。反气旋涡中的流场顺时针旋转(气旋涡逆时针旋转),涡心位置与ADCP观测的速度转向位置一致。3个涡旋的地转流断面(图5a1~a3)都呈现出涡核边缘速度相对较大,而涡心处速度较小的特征。此外,构建的地转流的速度量级与ADCP观测的速度量级相一致。这些特征在构建结果和观测结果中都清晰地显示出来。

图6进一步对比了3个涡旋构建的密度断面与同期现场观测的密度断面(去除了进行同化的剖面)之间的差异。如图6所示,在XCTD观测期间,构建得到的密度等值线均存在不同程度的涌升和沉降,较明显地反映出该时期涡旋内部海水的升降运动。并且在3个涡旋主要影响范围内选取的代表性等密度线(白线),其起伏形状与振幅均与XCTD现场观测(黑线)相吻合。与观测断面相比,构建的涡旋实时结

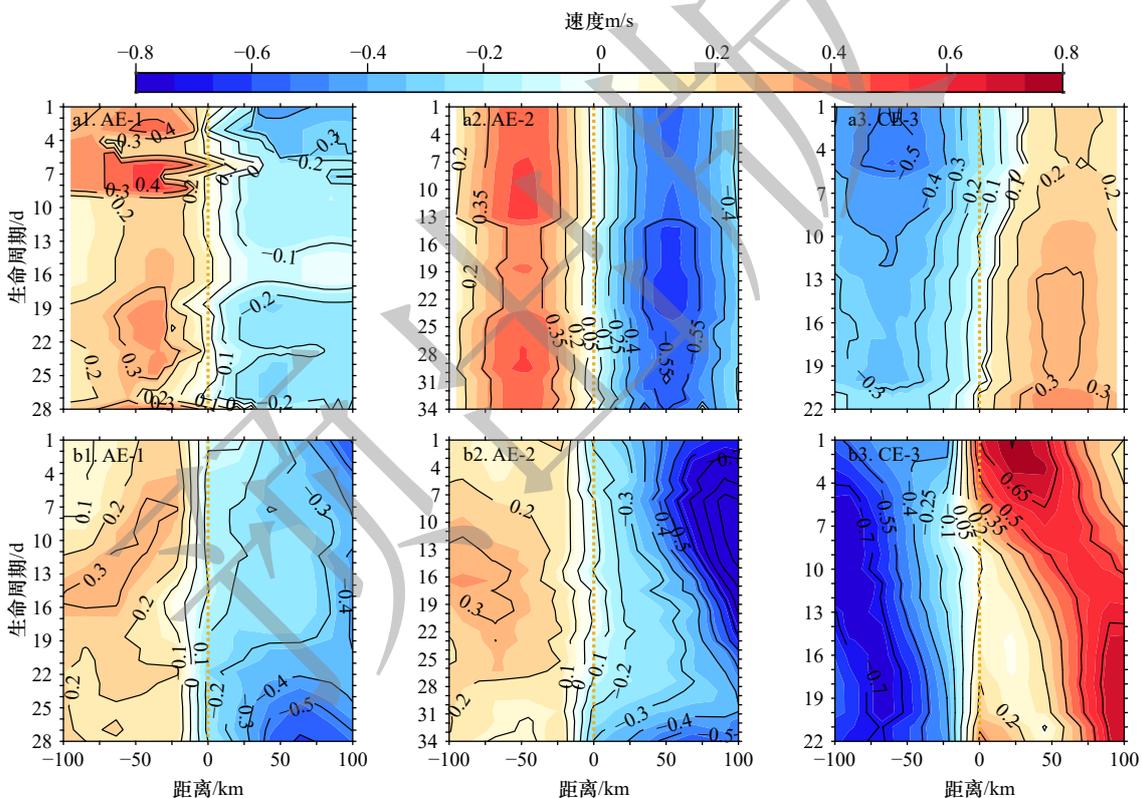


图4 3个涡旋生命周期内由构建结果(上)与卫星观测数据(下)计算的地转流断面,黄色虚线为涡心位置。速度的正方向指垂直平面向里;相反,速度的负方向指垂直平面向外

Fig. 4 Geostrophic cross section calculated from constructed results (top) and satellite observation data (bottom) during the lifetime of three eddies, the yellow dot lines are the locations of the eddy centers. The positive direction of velocities refers to the inward perpendicular to the plane (paper surface). Conversely, the negative direction is the outward perpendicular to the plane

构的密度变化更为平滑,这可能与梯度依赖OI方法所呈现的加权平均或过滤的作用有关。相较而言,暖涡(AE-1和AE-2)区构建的等密度线的变化趋势和低密度峰值与实际观测更为接近(图6a1-a2),而冷涡区实测等密度线的高密度峰值与涡心稍有偏离(图6a3),

这或许与观测断面的垂直设置以及经向断面较长有关。

4.4 数值模式数据检验

为了进一步从整体上验证涡旋实时结构的可靠性,图7、8、9展示了3个涡旋构建的密度异常以及数值输出流场的实时演变。由于本文仅沿着涡旋内

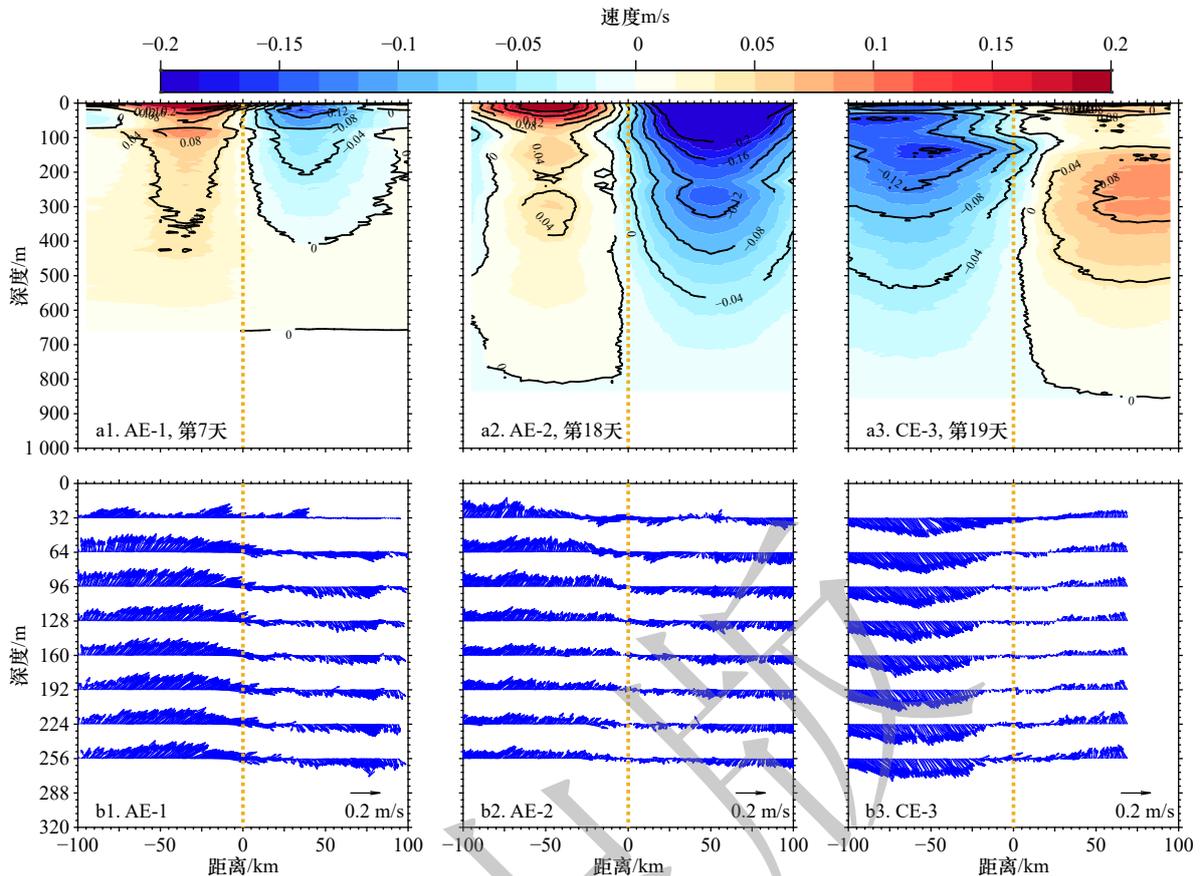
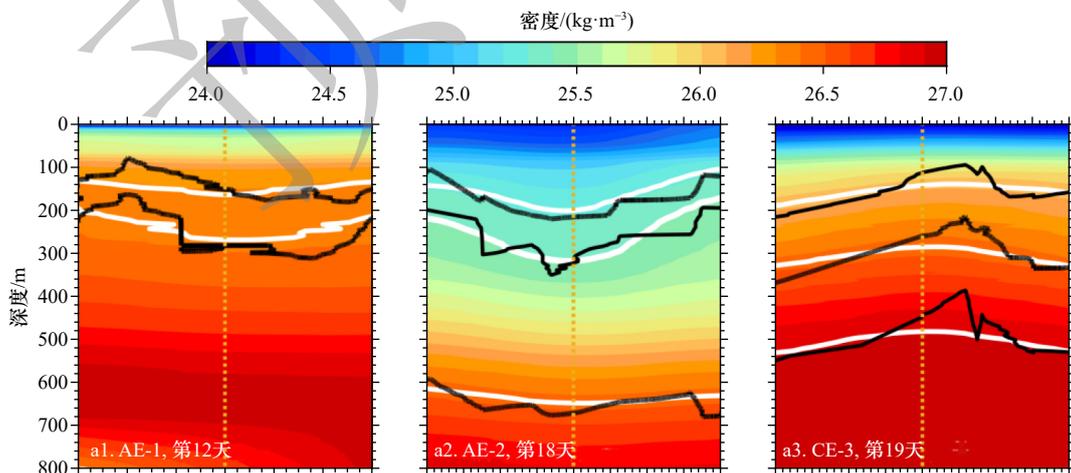


图5 由构建结果计算的地转流断面(上)与ADCP观测流速(下)对比,黄色虚线为涡心位置。速度的正方向指垂直平面向里;相反,速度的负方向指垂直平面向外。

Fig. 5 Comparison of geostrophic current section (top) calculated from the constructed results with the observed velocity of ADCP (bottom), the yellow dot lines are the locations of the eddy centers. The positive direction of velocities refers to the inward perpendicular to the plane (paper surface). Conversely, the negative direction is the outward perpendicular to the plane



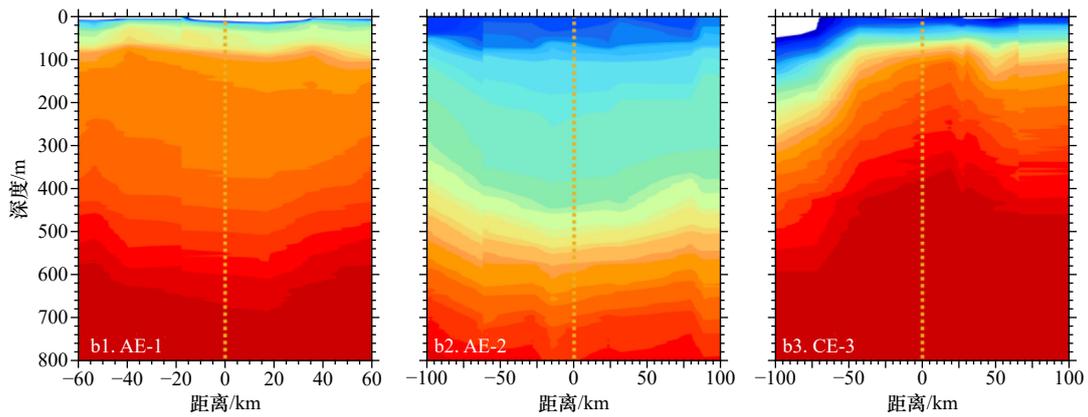


图 6 3 个涡旋构建密度断面(上)与同期实测密度断面(下)的比较

Fig. 6 Density section comparison between constructed results (top) and XCTD observation (bottom)

图 a1 中白线表示 AE-1 反演位势密度场中 26.37 kg/m^3 、 26.31 kg/m^3 等密度线; 图 a2 中白线表示 AE-2 反演位势密度场中 25.28 kg/m^3 、 25.4 kg/m^3 、 26.45 kg/m^3 等密度线; 图 a3 中白线表示 CE-3 反演位势密度场中 26.06 kg/m^3 、 26.45 kg/m^3 、 26.9 kg/m^3 等密度线;

黑线是在相应位置由 XCTD 观测到的对应等密度线; 黄色虚线为涡心位置

The white lines are isodensity lines of 26.31 kg/m^3 and 26.37 kg/m^3 in AE-1, 25.28 kg/m^3 , 25.4 kg/m^3 , and 26.45 kg/m^3 in AE-2, and 26.06 kg/m^3 , 26.45 kg/m^3 , and 26.9 kg/m^3 in CE-3, obtained by reconstruction; the black lines are the isodensity lines at the corresponding locations observed by XCTD; the yellow dot lines are the locations of the eddy centers.

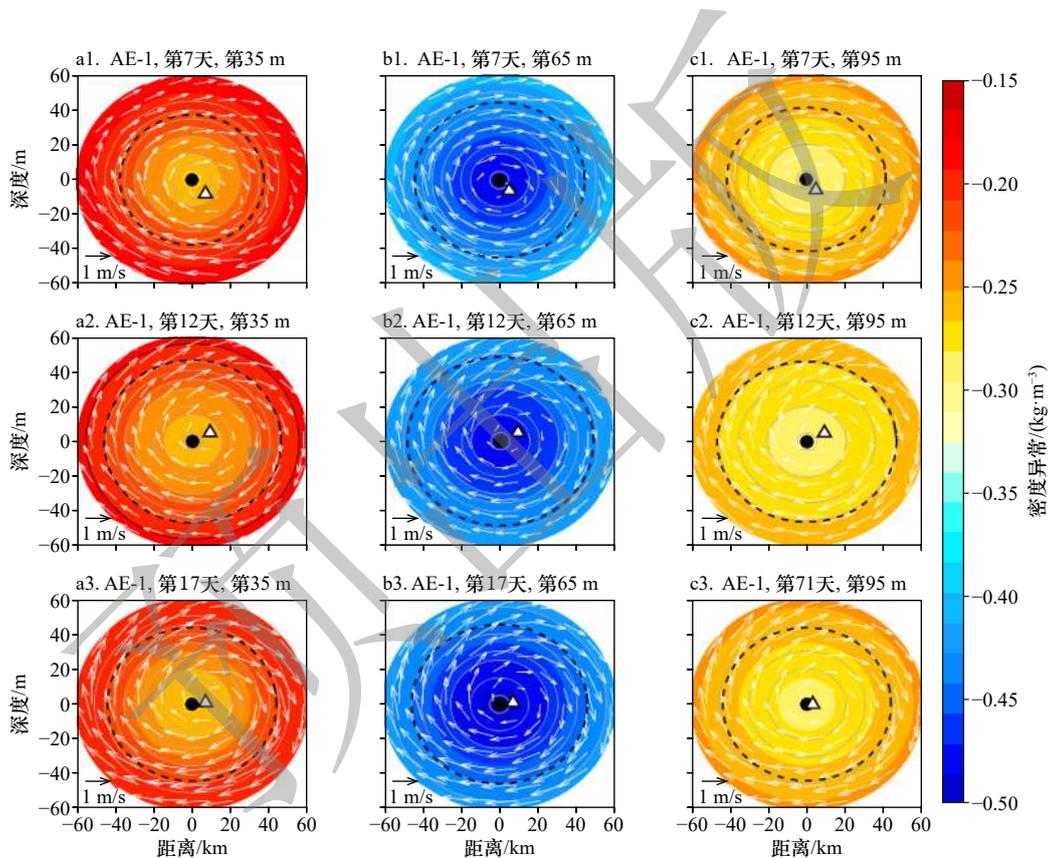


图 7 AE-1 实时密度异常结构

Fig. 7 Real-time density anomaly structure of AE-1

白色箭头为由模式数据得到的次表层流, 黑色虚线为由次表层流计算的涡旋半径, 黑色圆点为构建结果的涡心位置,

白色三角形为由次表层流计算的涡心位置

The white arrow is the subsurface current from numerical output, the black dotted line is the eddy radius calculated from subsurface current, the black dots are the eddy centers obtained from constructed results, the white triangles are the eddy centers calculated from subsurface current

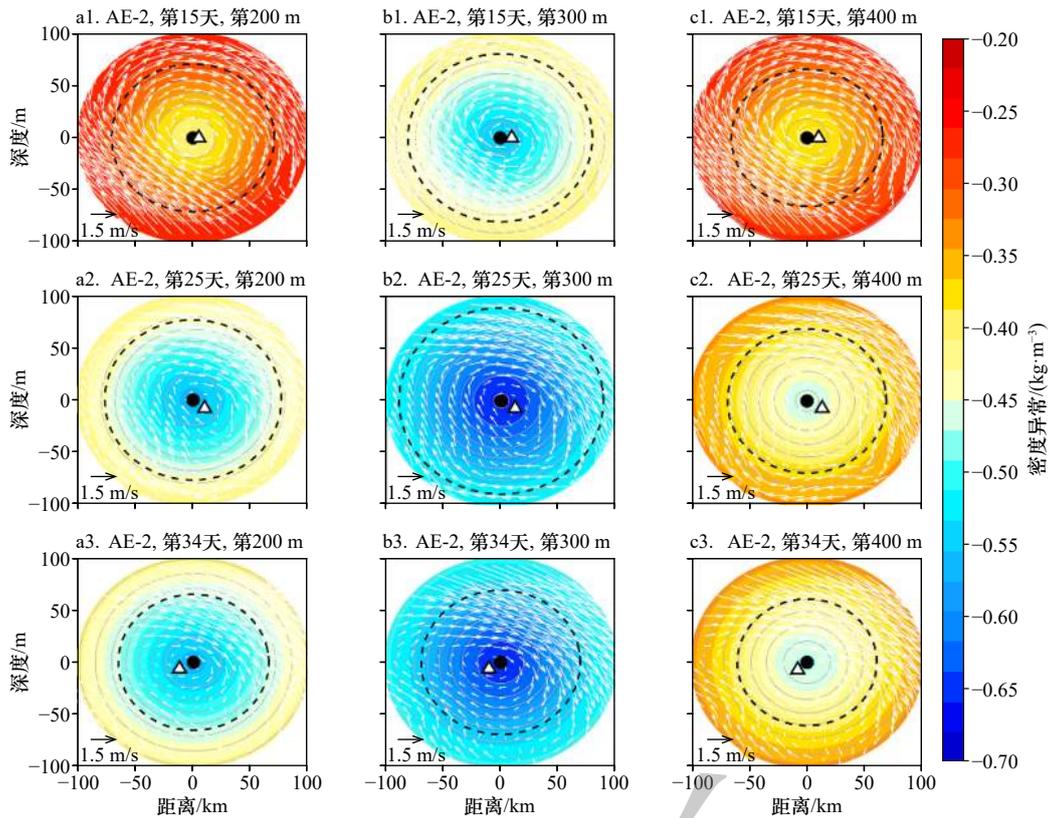


图8 AE-2实时密度异常结构

Fig. 8 Real-time density anomaly structure of AE-2

白色箭头为由模式数据得到的次表层流, 黑色虚线为由次表层流计算的涡旋半径, 黑色圆点为构建结果的涡心位置, 白色三角形为由次表层流计算的涡心位置

The white arrow is the subsurface current from numerical output, the black dotted line is the eddy radius calculated from subsurface current, the black dots are the eddy centers obtained from constructed results, the white triangles are the eddy centers calculated from subsurface current

的一条直线来构建, 用涡心右半部分的构建值来表示整个涡旋就可得到轴对称的实时结构(图7-图9)。暖涡内的密度明显低于同深度的周围海水(图7和图8), 且流场具有明显的顺时针闭合环流特征。在涡旋时间序列的演变上, AE-1的负密度异常在暖核以上逐渐增大, 在暖核以下则先增大后减小, 对应的流速大小也有类似的演变特征, 而影响半径则随着涡旋演变先扩大再缩小, 这跟流场的散度相对应(图7)。与AE-1相比, AE-2密度异常结构的实时变化更为明显。随着涡旋的演变, AE-2的负密度异常在暖核以上以及暖核以下均逐渐增大, 与之对应的流速大小也有相似的演变趋势, 而AE-2的水平影响范围则先增大后减小。数值模式数据得到的平均半径和涡心位置均与构建的暖涡结构的边缘和暖核位置相一致。

CE-3的实时密度异常结构显示, 气旋涡内密度高于同深度的周围海水, 最大密度异常为 $0.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (图9)。此外, 气旋涡中的流场具有明显的逆时针闭合环流特征。随着深度的增加, CE-3的正密度异常(平均半径)

先增大后减小。在涡旋发展、增强到衰减阶段, 其正密度异常(平均半径)基本上呈逐渐增大的变化趋势。与反气旋涡相似, 数值模式数据得到的涡心位置和平均半径与构建的气旋涡结构的边缘和冷核位置基本一致。

5 结论

本文以黑潮-亲潮交汇区3个涡旋为例, 利用梯度依赖OI方法以及可用的观测数据构建了涡旋演变过程中的实时内部结构。通过卫星观测数据、现场观测数据以及数值模式数据来验证构建结果的可靠性, 同时, 阐述了构建的涡旋实时结构相对于背景结构的变化。

通过对比分析基于构建结果计算的3个涡旋生命周期内的地转流与卫星观测流场, 气旋涡(反气旋涡)表现出明显的逆(顺)时针环流特征, 且涡核边缘的速度较大, 而涡心处的速度相对较小。AE-1的表面流速相对较小, 这与卫星观测流场相一致。将根据

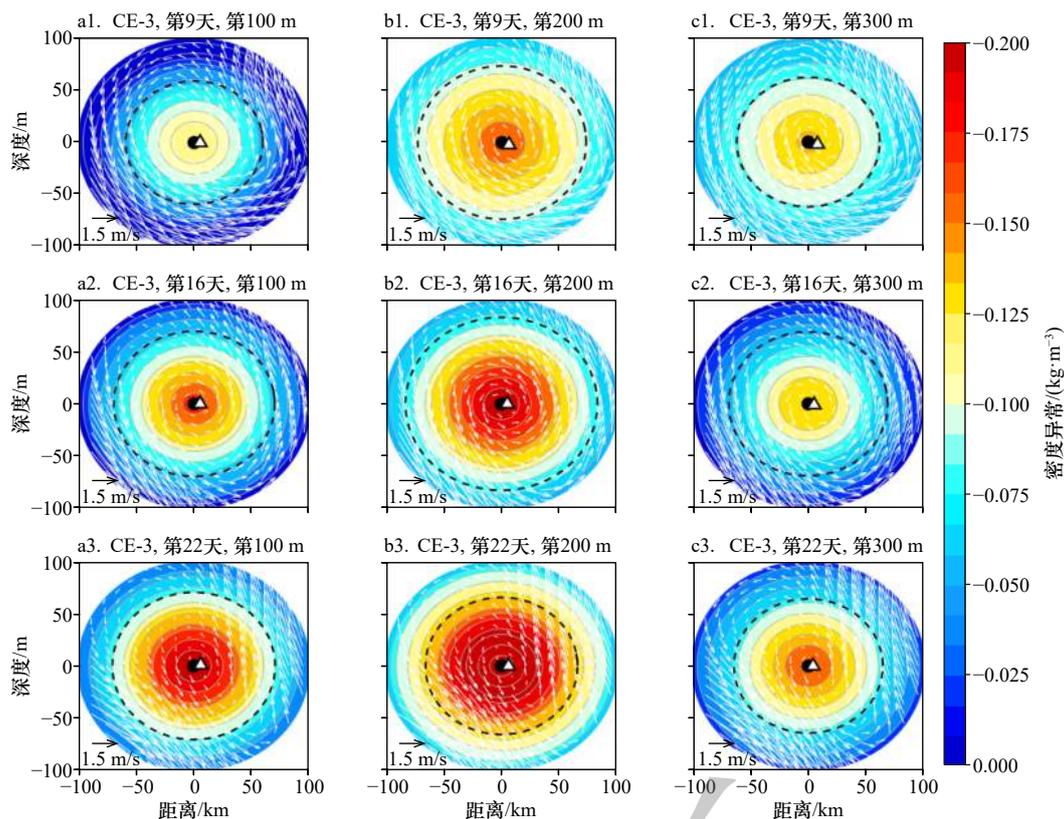


图9 CE-3 实时密度异常结构

Fig. 9 Real-time density anomaly structure of CE-3

白色箭头为由模式数据得到的次表层流, 黑色虚线为由次表层流计算的涡旋半径, 黑色圆点为构建结果的涡心位置, 白色三角形为由次表层流计算的涡心位置

The white arrow is the subsurface current from numerical output, the black dotted line is the eddy radius calculated from subsurface current, the black dots are the eddy centers obtained from constructed results, the white triangles are the eddy centers calculated from subsurface current

构建结果计算的地转流(0~1 000 m)与 ADCP 实测数据(32~256 m)对比, 发现涡心位置与 ADCP 观测的速度转向位置一致, 涡核边缘的速度较大, 而涡心处的速度较小。此外, 构建的地转流的速度量级与卫星观测和 ADCP 的速度量级相一致。通过对比构建的密度断面与同期 XCTD 现场观测的密度断面, 所选取构建结果的等密度线的起伏形状与振幅均与对应的 XCTD 现场观测相吻合。构建的涡旋密度异常与数值输出流场相比, 涡旋的影响半径和流场的散度相对应, 数值模式数据得到的涡心位置和涡旋平均半径均与构建得到的涡心位置和边缘相一致。即, 由梯度依赖 OI 方法构建的涡旋实时三维结构是可靠、可信的。

梯度依赖 OI 方法的优势在于能够从观测数据中充分提取中尺度信息, 这为构建中尺度涡的实时内部结构奠定了理论基础。然而, 该方法的准确性依赖于可用的观测资料, 并且许多参数对涡旋尺度和研究区域较敏感。本文由于缺少可用的观测数据, 3 个涡旋的实时内部结构仅在归一化坐标系中, 沿着涡旋内的一条直线构造, 构建结果为断面, 并没有把不同深度的整个涡旋结构构建出来。随着 Argo 剖面的不断积累以及日益增多的涡旋观测, 完全构建涡旋的实时非对称结构成为可能。此外, 中尺度涡的内部结构因生成机制、所处海域、运动特征等的差异各不相同, 涡旋演化过程中的统一结构须通过大量的个案分析来进一步研究。

参考文献:

- [1] Siegel D A, Peterson P, McGillicuddy D J, et al. Bio-optical footprints created by mesoscale eddies in the Sargasso Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13): L13608.
- [2] Chen Gengxin, Hou Yijun, Chu Xiaqing. 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.

- [3] Chen Gengxin, Hou Yijun, Zhang Qilong, et al. The eddy pair off eastern Vietnam: interannual variability and impact on thermohaline structure[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(7): 715–723.
- [4] 何忠杰. 西北太平洋副热带逆流区及其邻近海域中尺度涡研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
He Zhongjie. Study of mesoscale eddies in the subtropical ocean of the Northwest-Pacific and adjacent area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [5] Yang Guang, Wang Fan, Li Yuanlong, et al. Mesoscale eddies in the northwestern subtropical Pacific Ocean: statistical characteristics and three - dimensional structures[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(4): 1906–1925.
- [6] Bibby T S, Moore C M. Silicate: nitrate ratios of upwelled waters control the phytoplankton community sustained by mesoscale eddies in sub-tropical North Atlantic and Pacific[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(3): 657–666.
- [7] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167–216.
- [8] 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.
- [9] 胡冬, 陈希, 毛科峰, 等. 南印度洋中尺度涡统计特征及三维合成结构研究 [J]. *海洋学报*, 2017, 39(9): 1–14.
Hu Dong, Chen Xi, Mao Kefeng, et al. Statistical characteristics and composed three dimensional structures of mesoscale eddies in the South Indian Ocean[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(9): 1–14.
- [10] 谢旭丹, 王静, 储小青, 等. 南海中尺度涡温盐异常三维结构 [J]. *海洋学报*, 2018, 40(4): 1–14.
Xie Xudan, Wang Jing, Chu Xiaoqing, et al. Three-dimensional thermohaline anomaly structures of mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(4): 1–14.
- [11] 张正光. 中尺度涡 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
ZHANG Zhengguang. Mesoscale eddy[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [12] Lin Xiayan, Dong Changming, Chen Dake, et al. Three-dimensional properties of mesoscale eddies in the South China Sea based on eddy-resolving model output[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 99: 46–64.
- [13] Sun Wenjin, Dong Changming, Wang Ruyun, et al. Vertical structure anomalies of oceanic eddies in the Kuroshio Extension region[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(2): 1476–1496.
- [14] Zhang Chunling, Xu Jianping, Bao Xianwen, et al. An effective method for improving the accuracy of Argo objective analysis[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(7): 66–77.
- [15] Cressman G P. An operational objective analysis system[J]. *Monthly Weather Review*, 1959, 87(10): 367–374.
- [16] Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi - geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C5): 10143–10162.
- [17] Evensen G. The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation[J]. *Ocean Dynamics*, 2003, 53(4): 343–367.
- [18] Zhang Chunling, Wang Zhenfeng, Liu Yu. An argo-based experiment providing near-real-time subsurface oceanic environmental information for fishery data[J]. *Fisheries Oceanography*, 2021, 30(1): 85–98.
- [19] Nencioli F, Dong Changming, Dickey T, et al. A vector geometry-based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the southern California bight[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(3): 564–579.
- [20] Hosoda S, Ohira T, Nakamura T. A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations[J]. *JAMSTEC Report of Research and Development*, 2008, 8: 47–59.
- [21] Li Z Q, Liu Zenghong, Lu S L. Global Argo data fast receiving and post-quality-control system[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 502(1): 012012.
- [22] Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures[J]. *Journal of the ACM*, 1970, 17(4): 589–602.
- [23] Zhang Chunling, Wang Danyang, Liu Zenghong, et al. Global gridded Argo dataset based on gradient-dependent optimal interpolation[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(5): 650.
- [24] Kalnay E. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [25] Li Hong, Xu Fanghua, Wang Guihua, et al. A multi-layer linear rossby wave dispersion relation for vertical tilt of mesoscale eddies[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(12): e2022JC018703.
- [26] Pond S, Pickard G L. Introductory Dynamical Oceanography[M]. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1983.
- [27] Martin M, Dash P, Ignatov A, et al. Group for High Resolution Sea Surface temperature (GHRSSST) analysis fields inter-comparisons. Part 1: a GHRSSST multi-product ensemble (GMPE)[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 77–80: 21–30.

Real-time internal structure construction of mesoscale eddy based on gradient-dependent OI method in the Kuroshio-Oyashio confluence region

Zhang Mengli¹, Zhang Chunling^{1,2}, Fan Jiahui¹, Chuang Ziwei¹

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Remediation Technology, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200125, China)

Abstract: The real-time changes of the internal water structure accompanied by the evolution of eddies have always been one of the important influencing factors to further study the ecological effects of mesoscale eddies. Based on satellite altimeter and Argo profile data, the gradient-dependent optimal interpolation method is used to construct the real-time internal structures of eddies. The reliability and effectiveness of this method in constructing the real-time structures of eddies are systematically evaluated through comparison with satellite observation, in-situ data and numerical simulation data. The results show that the orders of magnitude for the reconstructed velocity of three eddies are consistent with satellite altimetry. Compared with the in-situ data of the ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP), it is found that the locations of the eddy centers are coincident with the velocity turning position of the ADCP observed sections. The fluctuation shapes and amplitudes of the isodensity lines of the three eddies are consistent with the XCTD (Expendable Conductivity-Temperature-Depth, XCTD) observations. In addition, the eddy center and mean radius of the numerical output are basically consistent with the constructed ones. Therefore, the gradient-dependent OI was a hopeful technique for representing the real-time internal features during eddy evolution.

Key words: real-time internal structure; mesoscale eddy; gradient-dependent optimal interpolation; internal structure