

文章编号: 1674-5566(2024)04-1005-15

DOI: 10.12024/jsou.20240404511

基于船舶观测的黑潮延伸体典型涡对的三维结构分析

卢宇辉¹, 程灵巧¹, 张俊¹, 陈新军², 魏永亮¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306)

摘要: 为理解黑潮延伸体(Kuroshio extension, KE)区域活跃的中尺度过程, 认识该海域中尺度涡旋的三维结构, 以及中尺度涡旋在水团再分配、海-气相互作用方面起到的贡献。基于船舶观测和卫星遥感数据, 研究了2022年6—7月分别分布于KE主流轴南北两侧的一个气旋式涡旋(CE)和反气旋式涡旋(AE)构成的典型涡对三维结构特征。结果表明: (1) CE存在南向跨锋运动, 剪切强迫主导了该CE的运动过程; AE则相对稳定地存在; (2) CE的“冷舌”结构在海表增温和黑潮暖水扩散作用下逐渐消退; 由于对CE所携带冷水的夹带作用, AE表现出“反涡旋海表面温度异常”的结构; (3) 该涡对内部温盐异常的多核结构与不同特性水团垂向再分配作用有关, AE内部流场斜压强, 理查德森数小于临界值0.25的占比达50%左右, 说明易引发湍流混合; CE上层垂向结构稳定, 正压性强, 使跨密面混合难以进行。该研究工作有助于提升对KE区域涡对特征和涡旋内部结构的认识, 为进一步的涡旋动力研究提供支撑。

关键词: 黑潮延伸体; 中尺度涡对; 演变特征; 三维结构

中图分类号: P 731.2 **文献标志码:** A

黑潮是世界大洋范围内最强的一支西边界流之一, 其在140°E、35°N附近与日本海岸分离后, 进入北太平洋的开阔盆地演变为黑潮延伸体(Kuroshio extension, KE)。在KE海域, 流场的不稳定导致KE流轴蜿蜒前行并脱落出大量中尺度涡旋, 使该海域成为北太平洋中尺度活动最活跃、涡动能(Eddy kinetic energy, EKE)最强的区域^[1-4], 并且也是北太平洋湍流混合最强烈的海域^[5-6]。同时, KE海域活跃的海-气相互作用使其成为中纬度地区大气与海洋相互作用的重要枢纽^[7-8]。中尺度涡作为最主要的运动形式之一, 在能量级串和海-气通量、海洋营养盐再分配和生物生产力方面扮演着重要角色, 因此开展针对该区域涡旋内部结构的观测研究, 将有助于加强人们对KE动力学特征及涡旋作用的深入理解。

伴随着卫星观测资料的日益增多以及涡旋识别和检测方法的日趋成熟, 前人已经对KE流轴及该区域涡旋开展了较广泛的研究。KE流轴

在年代际尺度上具有两种主导状态^[1,9], 一种是具有两个清晰准平稳弯曲的稳定状态, 另一种是当弯曲变得模糊时的不稳定状态。在不稳定时期, KE周边EKE整体增强, 并伴随高EKE面积的增大, KE流轴会往北分离出更多的暖涡^[10-12]。TATEBE等^[13]发现在KE上游流轴存在季节性南北低频变化, 且该变化受到在KE准平稳弯曲路径的波峰(35°N, 143°E)和波谷(34°N, 146°E)附近的两个与驻波相关的海平面高度(Sea surface height, SSH)极大值节点的调节。胡东等^[14]基于20年卫星高度计资料, 发现KE流轴周边的中尺度涡旋分布同样具有季节性, 指出涡旋总数在春季和夏季达到最大值, 伴有较高水平的平均涡度、EKE和涡能量密度(Eddy intensity, EI)。以上研究通过卫星观测数据, 得到了关于KE流轴的变动规律以及KE流轴附近中尺度涡旋的海表特征结构。

卫星遥感无法观测海洋内部结构, 因此学者

收稿日期: 2024-04-22 修回日期: 2024-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(42130402); 农业农村部全球渔业资源调查监测评估(公海渔业资源综合科学调查)专项(D-8025-23-1002)

作者简介: 卢宇辉(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为物理海洋学。E-mail: m220200609@st.shou.edu.cn

通信作者: 程灵巧, E-mail: lqcheng@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

们通过开展现场观测获得中尺度涡旋的垂向空间分布。MARTIN等^[15]研究北大西洋中尺度涡旋中的垂直养分输送机制,针对反气旋涡旋的实测发现由涡旋绕圆周运动的扰动所引起地转环流会引起海表营养物质来源增强。ITOH等^[11]结合卫星高度计资料和Argo剖面数据,分析了KE准平稳流轴区域涡旋的内部结构。结果表明,85%以上的反气旋涡旋具有高盐暖核结构,并且涡旋在垂直方向上具有双核结构,上层为高盐暖核,下层为低盐冷核结构。ZHANG等^[16]基于KE区域的现场观测资料,对表现出强烈温度异常的冷涡,从生成到脱离黑潮整个阶段进行了能量收支分析,指出该冷涡形成的平流过程能量主要来源于黑潮,并且与黑潮完全分离后,涡势能和涡动能进一步增强。李敏华等^[17]利用船舶观测数据对2019年上半年KE区域一个典型冷涡进行分析,发现其冷核中心位于300 m水层,垂向温、盐等值线具有强的上突结构,同时涡旋东侧边界浮游生物丰富。

随着对中尺度涡旋的深入研究,涡对之间的涡流动力学和潜在的生态效应也吸引了众多学者的关注。NI等^[18]指出全球海洋中30%~40%的中尺度涡旋以涡对的形式存在,在高能量区域的比例更高;中尺度涡对能够增强埃克曼抽吸流速,促进垂向运动到达更深层,对生物地球化学过程具有重要作用。YANG等^[19]研究发现了南大洋厄加勒斯回流区域涡对之间出现的明显冷涡丝,这种涡对内部偶极子涡旋之间的相互作用与涡对偶极子本身结构的演化有关,最终导致气旋涡上层冷异常中心及高叶绿素中心。然而与单个涡旋一样,对于涡对的三维结构理解相当有限,三维结构的直接观测仅限于少数几次海洋巡航^[20],需要辅以卫星遥感观测和海表数据进行内部重建。

由于观测条件限制等原因,截至目前针对KE海域中尺度涡内部结构的观测依然相对有限,导致相关研究一直处于较为短缺的状态。同时上述针对KE区域的研究大多集中在其上游(153°E以西),鲜少有关于KE中下游中尺度涡旋对水团运输和交换作用的研究。因此,本文基于2022年夏季上海海洋大学远洋渔业调查船“淞航”号在西北太平洋针对一个涡对开展的加密观

测,结合该时间段的卫星高度计资料,综合研究了目标涡对垂向温盐特性、流场结构及对水团平流和再分配的影响,旨在揭示KE流轴附近中尺度涡旋在内部物质输运和热量交换上的具体作用。

1 数据与方法

1.1 数据

2022年6月至8月,上海海洋大学远洋渔业资源调查船“淞航”号在西北太平洋开展了生物地球环境综合调查。本航次针对KE流轴附近的一个典型涡对,即同时出现的一个气旋式涡旋(Cyclonic eddy, CE)和一个反气旋式涡旋(Anticyclonic eddy, AE)进行了共计23个站点的重点加密观测(图1)。该航次分别于6月23日和7月2日观测了AE和CE,在这两个涡旋范围分别进行了两个交叉断面观测。整个涡对加密观测时间间隔为10 d,因此认为其间的时间变化有限。在加密站点上,利用青岛郎格润有限公司生产的抛弃式温盐深仪(Expendable Conductivity Temperature and Depth profiler, XCTD, LMT-XCTD2000)对海表至2 000 m深度进行观测。XCTD采样率为20 Hz,温度精度±0.02 °C,电导率精度±0.03 mS/cm,深度精度±3.0 m。同时,利用船载声学多普勒海流剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP, OS-38 kHz)观测获得涡旋内部流场分布,测量层共15层,首层深度为33.09 m,每层相隔16 m。

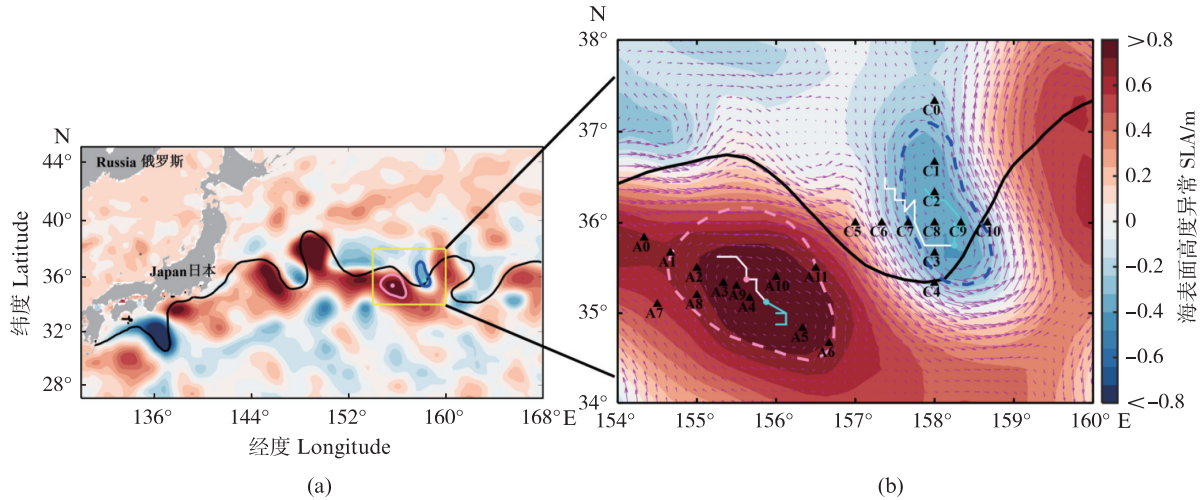
本文用于涡旋探测与追踪的数据来自AVISO卫星高度计资料。其融合了Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, Topex/Poseidon, ENVISAT, Geo Follow-On和ERS1/2多卫星数据,现由COPERNICUS海洋环境监测服务中心提供,其中包括海表面高度(Sea surface height, SSH),海表面高度异常(Sea level anomaly, SLA)和海表地转流速异常(u' , v'),时间分辨率为1 d,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。地转流速异常是基于地转关系由SLA计算得到,计算公式:

$$u' = -\frac{g}{f} \frac{\partial h'}{\partial y} \quad (1)$$

$$v' = \frac{g}{f} \frac{\partial h'}{\partial x} \quad (2)$$

式中: h' 为SLA, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; f 为科氏参数, rad/s 。在涡旋探测之前,将卫星遥感数据线性插值到 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 的网格。对2022年1月1日到2022年7月31日共7个月期间西北太平洋($27^\circ N \sim 45^\circ N$, $130^\circ E \sim 168^\circ E$)的涡旋进行探测,选取该范围内日本以东太平洋一侧生命周期大于7 d,

振幅大于2 cm的结果进行统计分析^[21]。根据SUGIMOTO等^[12],将黑潮主流轴定义为SSH的南北梯度的最大值来确定KE流轴的月均位置(图1中黑色实线所示)。海表温度(Sea surface temperature, SST)来自美国国家环境信息中心数据库,时间分辨率和空间分辨率均与SLA数据保持一致。



黑色实线为6月平均KE流轴位置,黄色框内为涡旋具体位置;右图紫色矢量箭头为涡对区域海表面地转流场异常,蓝、红色虚线及蓝绿色圆点分别为7月2日CE和AE边界和涡心,粉红色圆点为6月23日观测当天AE涡心位置。XCTD站点由三角形标记。白线和蓝绿色线分别为7月2日之前和之后两涡旋涡心的移动轨迹。

The black solid line represents the average KE path in June, and the yellow box represents the specific position of the dipole. The purple vector arrow in the right represents the anomaly of the sea surface geostrophic flow field. The blue and red dashed lines, and blue-green dots represent the boundary and eddy center of CE and AE on July 2, respectively. The pink dots represent the position of the AE eddy center observed on June 23. The XCTD site is marked by a triangle. The white line and blue-green line represent the movement trajectories of the two eddies centers before and after July 2, respectively.

图1 2022年7月2日研究海域海表面高度异常分布(a)以及涡对观测站点分布(b)

Fig. 1 Sea level anomaly (SLA) distribution in the study region (a) and station distribution in the eddy dipole region (b) on July 2, 2022

1.2 研究方法

本文使用NENCIOLI等^[22]提出的流场几何法对涡旋进行探测。该方法根据涡旋速度场特征提出了相应的4个约束条件,满足所有约束条件的点被定义为涡旋中心,即为几何约束法来对涡旋进行提取和跟踪^[23-25]。中尺度涡旋的特征可以由一些参数来表征,本文将利用海表地转流速异常数据计算以下的几个参数来描述中尺度涡旋的运动学特征,首先涡动能(Eddy kinetic energy, EKE)的公式:

$$EKE = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2) \quad (3)$$

涡能量密度(EI)定义为涡旋范围内平均涡动能除以涡旋的面积,即:

$$EI = \frac{\overline{EKE}}{\pi R^2} \quad (4)$$

式中: R 为涡旋半径, m。

涡旋平均相对涡度(ζ)定义为该涡旋范围内所有单位网格距离范围内的涡度平均值,计算公式:

$$\zeta = \frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y} \quad (5)$$

式中: x 和 y 分别为东西向与南北向距离。涡旋的形变率可用来判断涡旋的拉伸-剪切情况,散度则用来判断涡旋是否处于稳定的状态。剪切形变率(γ_1)、拉伸形变率(γ_2)以及散度(ψ)计算公式:

$$\gamma_1 = \frac{\partial v'}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial y} \quad (6)$$

$$\gamma_2 = \frac{\partial u'}{\partial x} - \frac{\partial v'}{\partial y} \quad (7)$$

$$\psi = \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} \quad (8)$$

此外,通过计算理查森数(Richardson number, Ri)来评估涡旋内部流体的稳定性。当

Ri < 0.25 时, 流体处于不稳定状态, 是湍流混合发生的必要条件。其计算公式:

$$Ri = N^2/S^2 \quad (9)$$

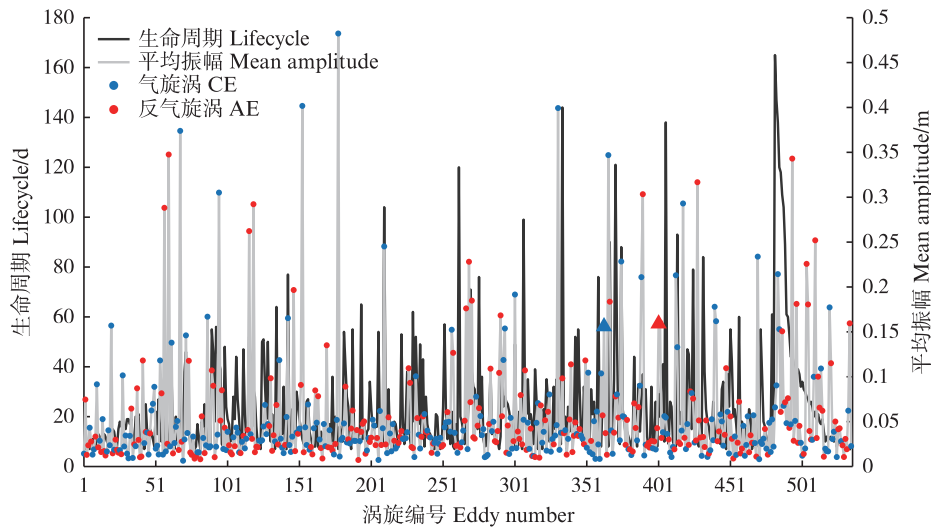
式中: $N^2 = -\left(\frac{\rho}{g}\right) \cdot \left(\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial z}\right)$ 为浮力频率的平方; g 为重力加速度, m/s^2 ; σ_θ (kg/m^3) 和 ρ (kg/m^3) 分别为位密和海水密度; z 为垂向深度。 $S^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2$ 为平均剪切的平方, 由 ADCP 测量数据计算而来。

2 黑潮延伸体涡旋特征分析

2.1 涡旋特征统计

在本研究观测期间内, $150^\circ E$ 附近的曲流向北弯曲严重(图 1a 黑线), 因此基于前人判定标准判断此时 KE 处于不稳定状态^[1,9], 会有更频

繁的中尺度涡旋活动^[11-12,26]。检测结果显示, 在 2022 年 1—7 月, 西北太平洋共有 535 个稳定存在的中尺度涡旋。如图 2 所示, 如果将这些涡旋按照生成日期的先后顺序进行编号, 那么本文的目标涡对包含了 363 号的 CE 和 401 号的 AE。这 2 个涡旋分布于 KE 主流轴中下游的南北两侧(图 1), 都属于生命周期超过 25 d, 平均振幅大于 0.15 m 的显著涡旋。其中 AE 在生命周期中一直沿着 KE 主轴缓慢向东南移动, 平均振幅为 0.16 m; CE 前期往东南跨锋面方向移动, 后期往西北方向折返, 在观测当天刚好移动到生命周期中的最南端, 平均振幅同样为 0.16 m。CE 的运动伴随 KE 流轴的显著向南弯曲, 但是整个生命周期内 CE 未能跨过 KE 流轴到达其南侧。



黑色实线表示生命周期, 灰色实线表示平均振幅, CE 和 AE 分别以蓝色和红色实心圆标记, 三角符号指示了目标涡旋。

The black solid line represents the lifecycle; the gray solid line represents the average amplitude; CE and AE are marked with blue and red solid circles respectively; and the triangle symbol indicates the target eddies.

图 2 2022 年西北太平洋 1—7 月振幅大于 2 cm 且生命周期大于 7 d 的所有中尺度涡生命周期和平均振幅分布
Fig. 2 Distribution lifecycle and mean amplitudes of detected mesoscale eddies with amplitude greater than 2 cm and lifespan longer than 7 days in Northwest Pacific Ocean from January to July in 2022

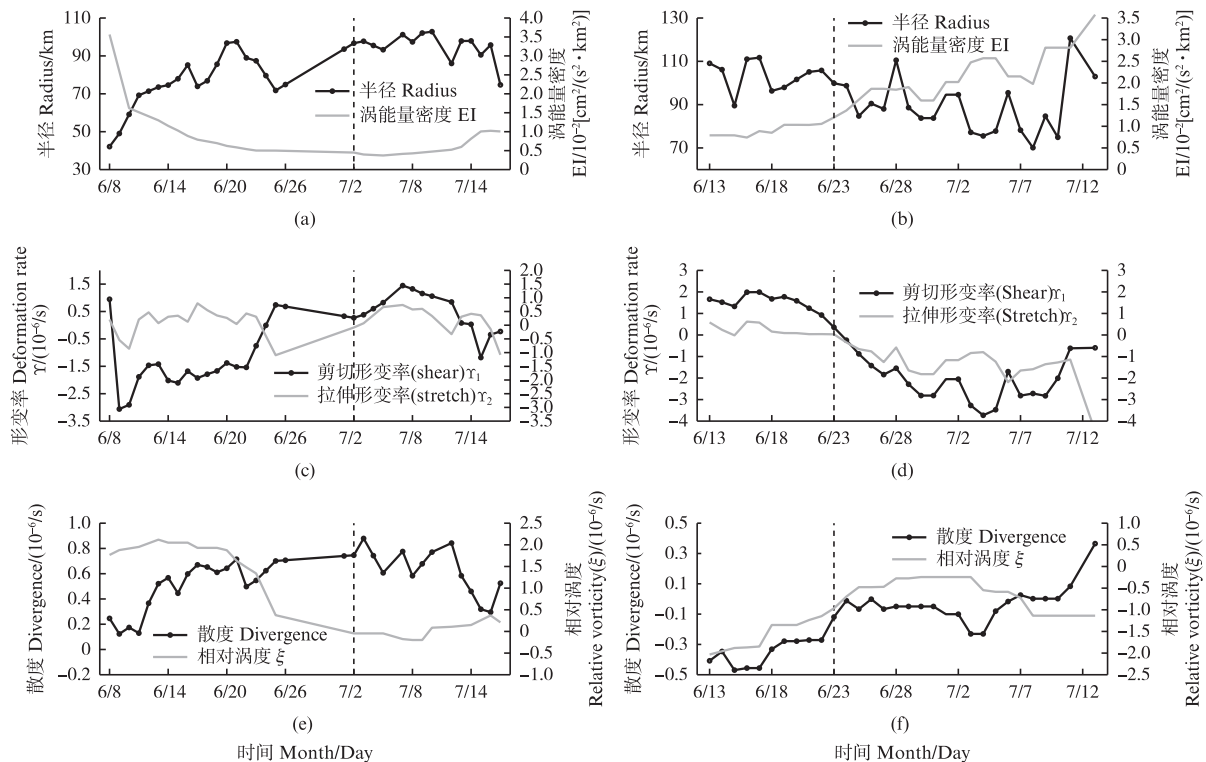
图 3 给出了目标 CE 和 AE 的半径、涡能量密度、散度、相对涡度、形变率的时间序列, 以此分析涡旋生成到消亡过程的运动学特征。在 6 月 26 日至 7 月 1 日的 5 天期间, 由于 CE 形变严重, 涡旋识别方法未能检测到其涡心和边界, 这里仅基于其他日期识别出的结果进行分析。在前期当 CE 涡心往东南向移动到最接近 KE 流轴的过程中, EI 缓慢减小, 在 7 月 2 日之后则呈现出缓慢增大的趋势。从形变率来看, 在往东南方向运动的过程中内部 γ_1 基本以负值为主, 大部

分保持在 $(-2.5 \sim -1.5) \times 10^{-6} /s$ 。从 6 月 24 日开始, 负的 γ_1 开始减小并逐渐转为正值, 其后一直持续到 7 月中旬。在整个生命周期内 γ_2 大部分保持在稍大于 0 值的状态, 相比剪切作用, 对 CE 形变贡献有限。与 γ_1 的变化相对应, 前期 CE 的 ζ 持续处于较高水平 ($>1.5 \times 10^{-6} /s$), 在 7 月 2 日 ζ 降低到 0 值附近, 并在保持几天后于 7 月 5 日到 7 日之间呈现微弱的负值。CE 散度整体增大, 并在 7 月 3 日达到最大值 (约 $8.5 \times 10^{-5} /s$)。从 6 月 21 日开始, CE 半径从 97.4 km 左右快速减少到

17.7 km,随后在7月2日又恢复到96.7 km,并在之后较长时间保持高值。这些运动学特征说明在CE前期从西北往东南方向移动的过程中,剪切强迫促使CE沿行进方向拉伸变形,但6月24日之后剪切作用减弱,对应CE内部相对涡度减小和向南跨锋(强流)运动减弱,并在7月2日出现折返。因此可知,剪切强迫主导了这个CE的海表形态和运动。

在AE生成早期半径较大,最大达110.0 km左右,之后整体缓慢减小到90.0 km以下(消亡阶段不稳定期除外)。从形变率来看, γ_1 和 γ_2 两者呈现出负向变化趋势,仅在6月23日之前的10 d

内为正值。在变化幅度上, γ_1 的变化幅度相对更大,无论在早期正值还是后期负值阶段都处于主导地位。与CE持续较高的散度水平不同,AE仅在生命周期的前10天具有相对较大的负散度,与形变率的变化趋势相对应,但是之后散度趋近于0,并在较长时间保持低值,说明了该涡旋具有较好的稳定性。因此,可以观察到伴随着半径减小、散度降低,AE的涡旋能量辐聚,对应EI增大;同时,在7月3日之前负的 ζ 缓慢减小,之后则出现再次小幅度增大。基于上述特点并结合图1中AE的海表形态可知,该AE具有相对稳定、涡旋能量聚集、整体形变效果有限的特点。



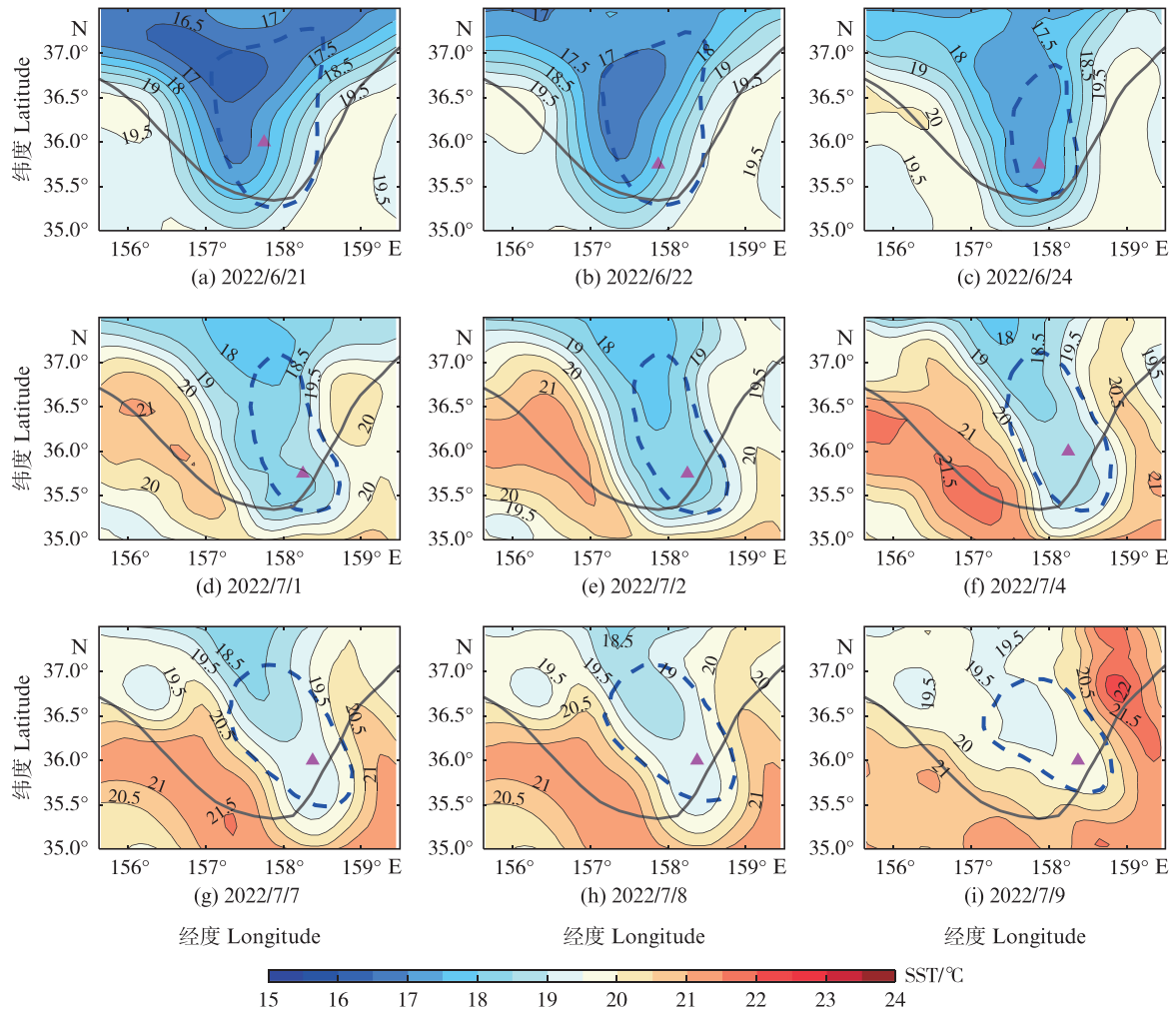
虚线表示两涡旋的观测日期;左分图为CE,右分图为AE相对应的运动学特征。
The dashed line represents the observation date of two eddies; kinematic characteristics for corresponded eddies with the CE on the left and the AE on the right, respectively.

图3 目标CE和AE的半径和涡旋范围内空间平均的散度、形变率和相对涡度和涡能量密度的时间序列
Fig. 3 Time series of radius and spatially averaged EI (a, b), deformation rate (c, d), and divergence and ξ (e, f) for the target eddies

2.2 涡旋水平和垂向水文特点

图4显示了目标涡对中CE各个生命节点的SST分布。该气旋涡生成后南移到KE流轴北边缘,形成明显的南向“冷舌”结构,造成流轴向南弯曲。在7月2日之前,随着CE持续东南向移动,涡旋结构受到挤压变形,“冷舌”结构变得狭

长且往东向偏离。在7月2日之后,CE强度减弱,开始往西北方向折返,期间海表增温和KE流轴黑潮暖水的扩散作用,致使“冷舌”特征变得模糊。在整个生命周期内,虽然CE范围表现出相对低温的特点,但是基于流场特征探测到的涡旋中心并不对应SST极小值。



黑色实线为6月平均KE流轴位置。

The black solid line represents the average KE path in June.

图4 CE生命周期各节点SST、涡边界(蓝色虚线)和涡心变动(粉色三角形)分布

Fig. 4 Distributions of SST, eddy boundary (blue dashed line) and center (pink triangle) at each time node of the lifecycle

相较于CE明显的“冷舌”结构,AE在整个生命周期内并不具有暖中心,反而对应低温核心(图5),符合前人^[27-28]定义的“反涡旋SST异常”。图5a和5b显示,该低温核心特点可能是AE生成早期东北侧CE所携带的冷水被AE夹带到内部并辐聚所致。6月下旬季节性增温背景下,KE流轴SST明显升高(6月19—27日期间升高了至少2℃),相对高温的黑潮水侵蚀到AE内部,缓解了涡旋内部的海表低温。但是从图5h和5i可知,6月26—27日期间AE东部对东侧冷水的夹带作用依然存在,导致在157°E~158°E形成明显的西南向冷水羽流。因此可知,CE虽然没能实现跨锋面到达KE流轴南侧,但是AE的夹带作用却将CE携带的海表部分冷水带至KE南侧。

KE区域存在2种重要的水团,分别是副热带模态水(Subtropical mode water, STMW)和北太平洋中层水(North Pacific intermediate water, NPIW)。STMW是一种生成自KE南侧冬季混合层的低位涡水团,具有垂向上变化不大的温度和盐度结构。前人将核心温度位于16~18℃的STMW定义为该水团的冷分支^[29-30]。NPIW生成自西北太平洋KE北侧副极地锋面附近,以300~800m深度范围内盐度的极小值为主要特征,对应位密(σ_θ)范围在26.7~26.9 kg/m³^[31-32]。图6显示了基于XCTD加密观测获得的两个目标涡旋内海表至观测有效深度(1400 dbar左右)的垂向位温(θ)、盐度(S)断面分布。在AE内部,STMW广泛分布于50~400 dbar,具有显著的 θ 、S垂向均一

性。自 STMW 下界面开始,从涡边缘往中心方向,等温线及等盐线下凹明显,且这种下凹特征延续到 1 200 dbar 以下,符合 AE 内部海水辐聚下沉的特点。NPIW 分布于 700~900 dbar 深度,对应盐度极小值 S_{min} 约为 33.8。CE 范围内上表层不再具有高盐水,16~18 °C 温度范围位于次表层 30 dbar 附近,明显的垂向温盐梯度说明该涡旋内不存在 STMW。另外与 AE 相反,CE 内部等温线和等盐线都表现出从涡边缘向中心上凸的特点。具体到 NPIW 所在层, S_{min} 基本位于 200~400 dbar,比 AE 内部 NPIW 所在深度上移了至少 300 dbar,对应 S_{min} 为 33.7 左右,比 AE 内部极值小约 0.1。这种 KE 流轴南北两侧 NPIW 核心盐度的差异,可

能与 NPIW 到达 KE 南侧受周围相对高盐水混合影响有关^[33]。在这两个涡旋内, S_{min} 都对应 26.4~26.8 kg/m³ 的 σ_θ 范围,略低于前人定义该水团的密度范围 (26.7~26.9 kg/m³)^[31-32]。KOUKETSU 等^[34]通过比较 1980 至 2000 年代的 NPIW 核心特征,发现期间 NPIW 核心盐度变化不大,但是其温度显著升高,导致 NPIW 核心密度减小。海表的热通量无法直接加热 NPIW, NPIW 的特性变化可能与其源头千岛海峡的垂向混合变动有关^[35]。由此可知,本文上述结果中 NPIW 核心密度偏低特征与该水团特性的长期变化趋势一致。

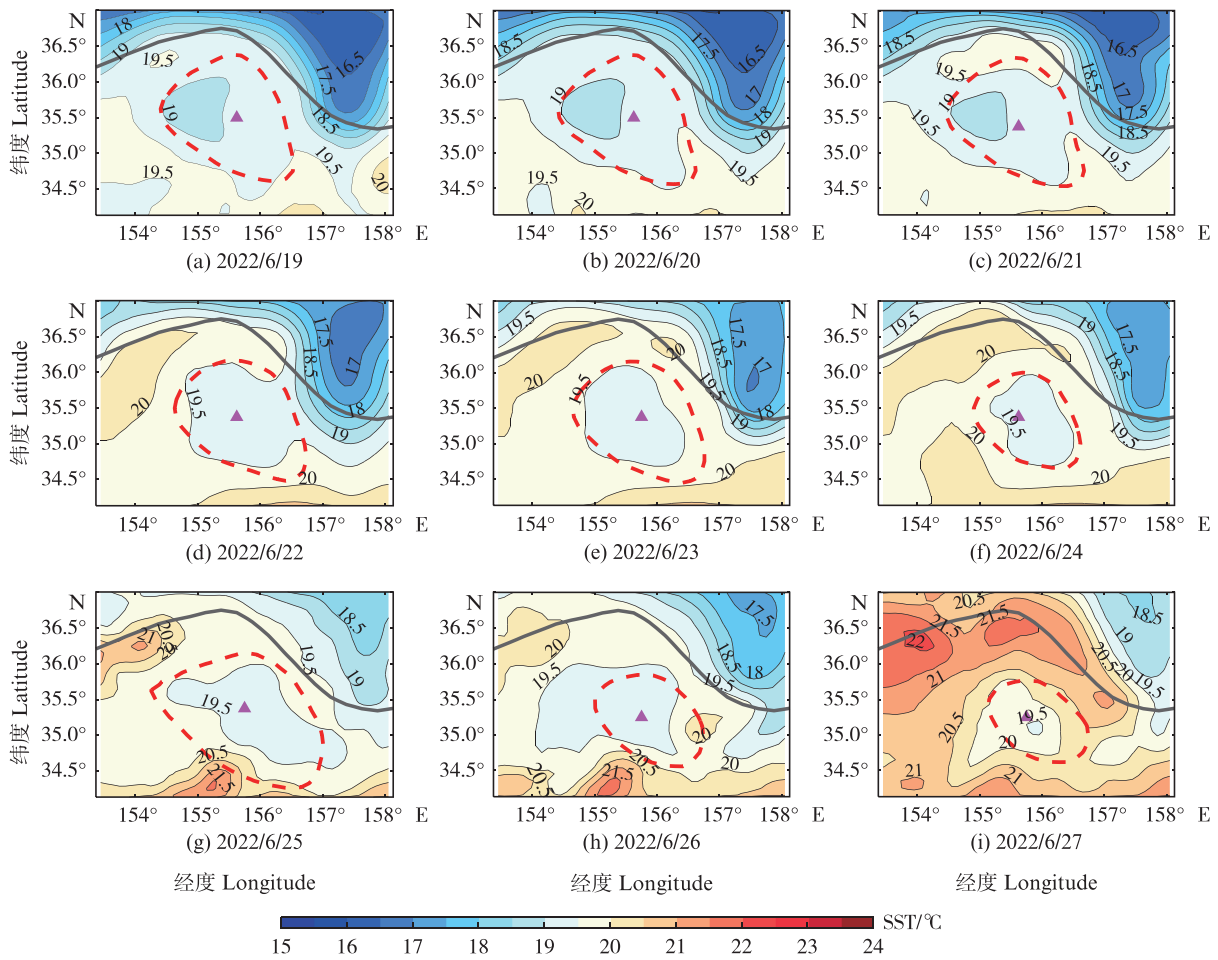
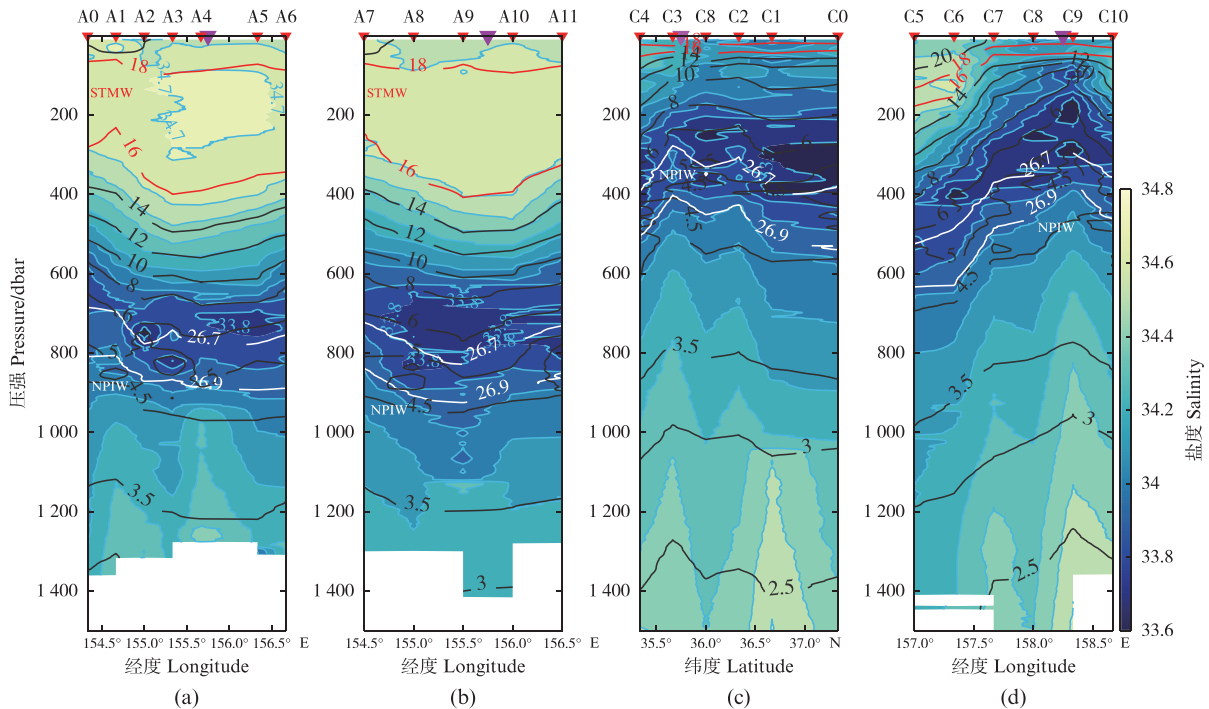


图5 AE 生命周期各节点 SST、涡边界(红色虚线)和涡心变动(粉色三角形)分布
 Fig. 5 Distributions of SST, eddy boundary (red dashed line) and center (pink triangle) at each time node of the lifecycle



背景颜色为盐度；黑色实线为温度等值线；红色实线为 16 °C 和 18 °C 等温线，分别表征 STMW 上下界；白色实线为 26.7 kg/m³ 和 26.9 kg/m³ 等密线，分别表征 NPIW 上下界。粉色倒三角表示涡旋所在位置。

The background color is salinity. The black solid line represents the temperature contour line. The red solid line represents the isotherms of 16 °C and 18 °C, respectively, representing the upper and lower boundaries of STMW. The white solid line represents potential density of 26.7 kg/m³ and 26.9 kg/m³, respectively, representing the upper and lower boundaries of NPIW. The pink inverted triangle represents the position of the eddy center.

图 6 AE(a, b)和 CE(c, d)位势温度-盐度断面结构分布图

Fig. 6 Cross-sectional structures of potential temperature(θ) and salinity for AE (a, b) and CE (c, d)

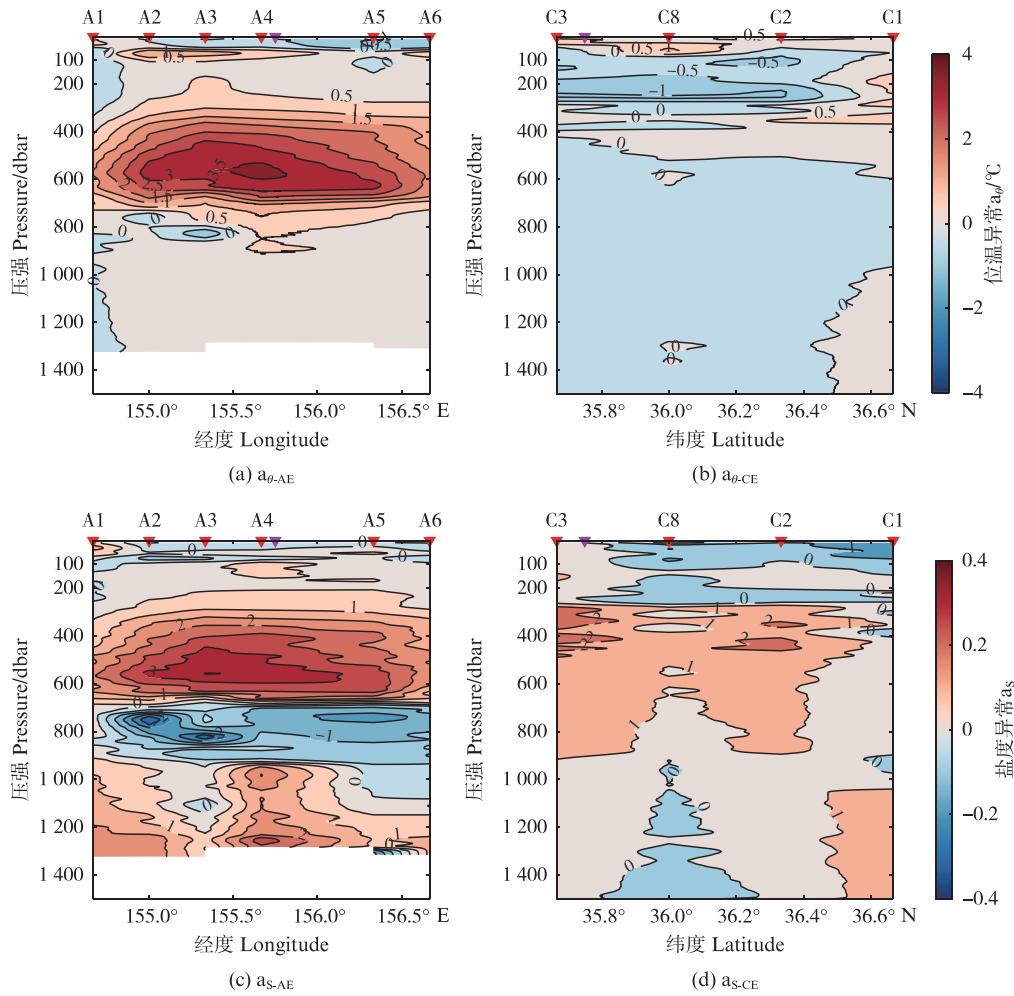
涡旋能够禁锢内部水团，实现远距离平流^[25,36-37]。因此，本文分别计算了两涡旋内部站点相对于涡边界站点(A0和C0)的垂向温盐异常(a_0 , a_s)(图7)。AE内部650 dbar以浅深度范围内温、盐正异常明显，两者核心位于550 dbar附近，分别具有约3.6 °C和0.33的极值。在该异常层之下的700~900 dbar具有盐度的显著负异常层，最大负异常达到-0.2以上。再往深处，盐度再次被正异常所主导。CE内部在300 dbar以浅深度范围存在低温和低盐异常特征。在该异常层之下存在一个明显的盐度正异常层，核心盐度异常达到0.2以上。这种垂向上多核的温盐异常分布与ITOH等^[11]在KE区域的观测结果一致。结合图6可知，该海域涡旋内部多核的温度和盐度异常与涡旋对水团的裹挟和垂向再分配有关，AE禁锢了较厚的STMW(相对高温高盐)实现水平输送，同时其内部NPIW的明显下沉作用造成了中间层的显著负异常；相反CE对水柱的抬升作用导致了其内部上负下正的盐度异常特征。

2.3 中尺度涡旋内部流场分布

船载ADCP获得CE和AE两涡旋内部257 m以浅共15层的流场分布。本节基于各站点上的6层水平矢量和沿着这2个涡旋航段获得的ADCP数据绘制的垂直和平行于观测断面的法向和切向流速分量断面图进行内部流场分析(图8和9)。首先在CE内部，垂向各层流速与海表地转流速异常场一致，都呈现出逆时针方向旋转的分布特征。CE涡心西侧的东南向流速最为显著，在涡旋外围之外C6站点附近次表层流速达到最大的120 cm/s以上。从流速分量断面分布(图8g~8j)可知，除图8h和8i中受KE流轴影响明显增强的南北向流速之外，涡旋内部各流速分量大多在0~30 cm/s，且相较于KE流轴(C6和C7附近)处垂向流速梯度大的强斜压性，CE内部流场垂向变化小，正压性明显。涡旋内部的平均流场显示，经向断面上涡心北侧的西向流占主导(图8g)；纬向断面上涡心东侧的北向流占主导(图8h)。此结果与CE接下来往西北方向折返的运动趋势一致。另外，图8i经向断面上，涡心以北的流速以

北向为主,涡心以南流速则以南向为主,促进了该涡旋自海表到内部的南北向拉伸,其中南向流在 50 m 以浅整体占主导;在图 8j 中 CE 的东西向观测断面内部以东向流速占主导,符合涡旋

水平结构整体往东弯曲的特点,且在 50 m 以东东向流达到最大(C7 站点)。由此可知,强劲的 KE 对 CE 垂向整体平移及表层水的输送具有重要作用。



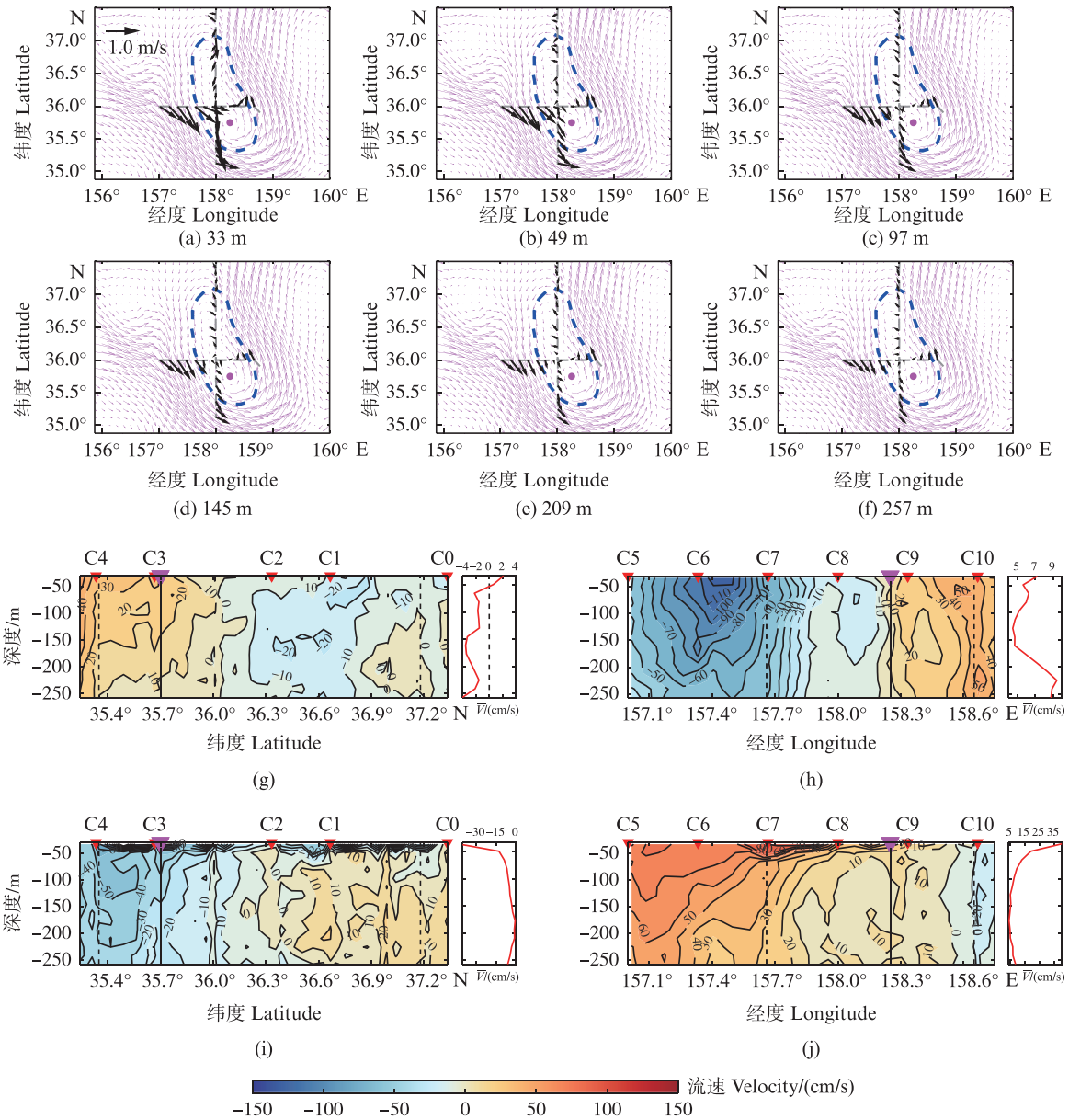
(a)和(b)分别为 AE 和 CE 的 a_{θ} , (c)和(d)分别为 AE 和 CE 的 a_S 。
 (a) and (b) show the a_{θ} for AE and CE, while (c) and (d) are the a_S for AE and CE, respectively

图 7 AE 和 CE 内部分别基于 A0 和 C0 站点剖面的位温异常 (a_{θ}) 和盐度异常 (a_S) 断面图

Fig. 7 Sectional distributions of θ and S anomalies (a_{θ} , a_S) relative to the profiles at A0 and C0, respectively

如图 9 所示, AE 内部从海表到 257 m 深度范围内流场大部分具有顺时针旋转的特点,符合反气旋式涡旋的运动学特征。观测断面的法向(图 9g 和 h)和切向(图 9i 和 j)流速分量显示, AE 内部流场的斜压性明显,且伴有亚中尺度过程。首先,在 A0~A6 断面上涡心西侧至 A2 范围上层(81 m 以浅)流速多为西南方向,而在更深处转为东北向;在整个断面的涡旋范围以西南向流速占主导。此外,涡心东侧的 A4~A5 之间 156 $^{\circ}$ E 附近的近海表存在与周围流场相反的东北向流速(图 9g)。该断面上层涡心两侧切向速度相反,但到 150 m 以深整

体以东南向流速为主(图 9i)。在 A7~A11 断面上,法向流速表现出典型的斜压性,特别是涡心西侧近海表层流速最大达 80 cm/s 以上,往深处逐渐递减。该断面上的切向流速在 100 m 以浅以东向为主,但是在 100 m 以深范围变得复杂,从西到东呈现正-负(涡心附近)-正-负(涡心附近)的分布,即东北和西南方向交替出现的状态。结合两断面上各层流速平均分布可知,图 1 中 AE 表层东南向移动的特征持续到其内部,且其具有将东北侧 KE 流轴附近水团往南边带的的能力。这也解释了图 5 中显示的 AE 夹带作用导致的其东南侧的冷羽流结构。

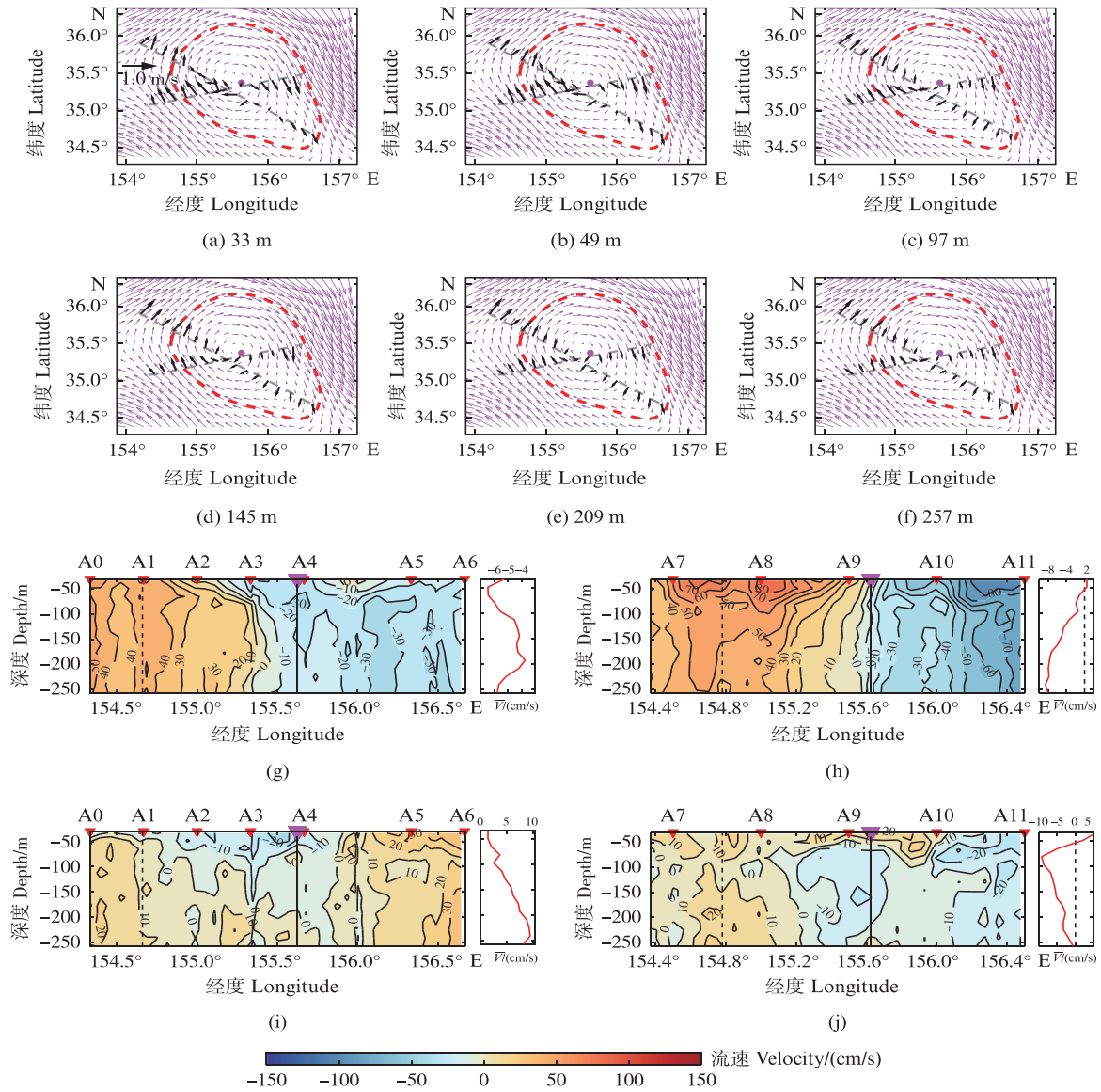


a-f中粉色矢量箭头代表海表地转流速异常,黑色箭头为ADCP测得对应深度上的流速。g-j中黑线代表涡心所在位置,虚线代表涡旋边界。流速方向为东向和北向为正;g-j分图右侧的折线图代表涡旋内部对应方向各层流速的平均值。

The pink vector arrow in a-f represents abnormal sea surface geostrophic flow velocity, while the black arrow represents the flow velocity at the corresponding depth measured by ADCP. The black line in g-j represents the position of the vortex center, and the dotted line represents the eddy boundary. The direction of flow velocity is positive in the east and north directions. The velocity profile on the right side of each panels from g to j represents the average velocity component with corresponded direction at each layer.

图8 CE两观测断面多层流速矢量分布(a-f),垂直于观测断面的流速分量断面(g和h)和平行于观测断面的流速分量断面(i和j)

Fig. 8 Velocity vectors at multiple layers along the two sections for the CE (a-f), sectional distribution of velocity component perpendicular to the observational sections (g and h) and sectional distribution of velocity component parallel to the observational sections (i and j)



平行于断面由 A0 到 A6 (A7 到 A11) 为切向速度正向, 垂直于断面向高纬方向为法向速度正向。
 The direction of flow velocity parallel to the sections from A0 to A6 (A7 to A11) is positive, and the direction of flow velocity perpendicular to the high latitude direction of the sections is positive.

图9 AE 内部流场分布
 Fig. 9 Velocity field in the AE interior

基于 N^2 和 S^2 计算获得 Ri (图 10 中的条带部分)。由温盐分布(图 6)可知 AE 内部该深度范围主要分布着垂向均一性较强的 STMW, 对应于较小的 Ri 值, 在两断面上 Ri 小于临界值 0.25 的占比分别达到 59.2% 和 48.6%, 说明 AE 内部上层流

场可能伴随着垂向湍流混合。另一方面, 在 CE 的两断面上(图 10c 和 10d), 0.25 以下的 Ri 值占比仅为 2.4% 和 9.5%, 大部分 Ri 值都大于 1, 说明 CE 上层流层结更为稳定, 跨密度面混合较难发生。

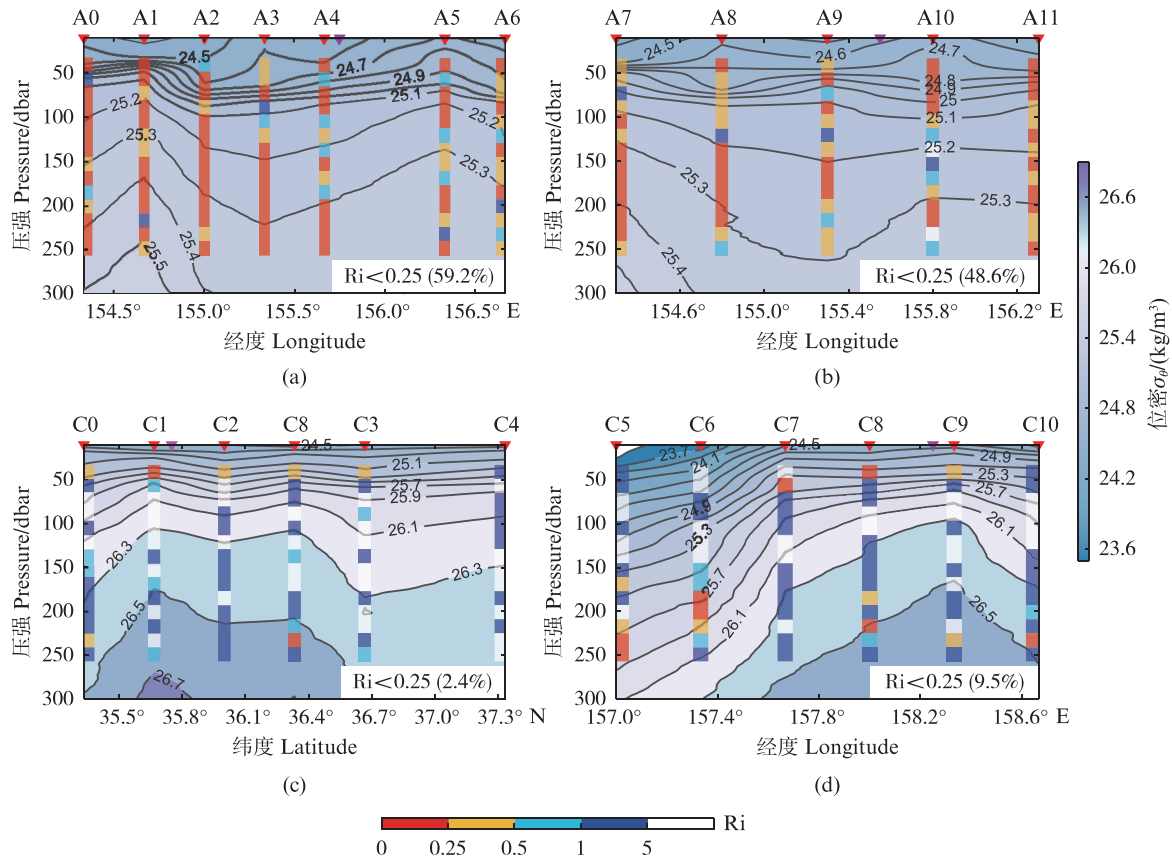


图 10 AE 和 CE 内部位密断面图(颜色和等值线)以及理查德森数 (Ri , 垂向条带)分布
Fig. 10 Sectional distribution of σ_θ (colors and contours), with Ri plotted by vertical strips within every 16 dbar grid

3 讨论

本文基于 2022 年 6—8 月期间上海海洋大学“淞航”号在西北太平洋开展的中尺度涡对加密调查数据以及卫星遥感数据, 对目标涡对的运动学及水平和垂向水文特征进行了系统解析。

3.1 目标中尺度涡对运动学特征

目标涡对在 KE 不稳定期生成, 分布于 KE 主流轴中下游的南北两侧, 都属于生命周期超过 25 d, 平均振幅大于 0.15 m, 影响深度深达 1 400 dbar 多的显著涡旋。剪切强迫主导了 CE 的海表形态和运动, 并且 CE 存在南向跨锋(强流)运动; 相较于 CE, AE 在形态上表现出较好的稳定性, 具有相对稳定、涡旋能量聚集、整体形变

效果有限的特点。

3.2 水平和垂向水文特征分析

CE 沿东南方向至 KE 流轴北边缘, 形成明显的“冷舌”结构, 伴随 KE 流轴弯曲。随着 CE 强度减弱反向折返, 海表增温和黑潮暖水的扩散作用, 致使“冷舌”特征逐渐消退。AE 表现为低温中心, 具有“反涡旋 SST 异常”的结构特点^[27-28], 其夹带作用将 CE 携带的海表部分冷水带至 KE 南侧。

垂向分布结果表明, 目标涡对内部盐度极小值所处密度, 都略低于前人定义的 NPIW 水团的密度范围^[31-32], NPIW 核心密度偏低的特征与以往研究得到该水团特性的长期变化趋势一致^[34-35]。AE 和 CE 内部温盐异常与 ITOH 等^[11]在

KE 区域观测到的多核特征一致,与这两个涡旋对不同特性水团(STMW、NPIW)的垂向再分配作用有关。在内部流场中,CE 上层(257 m 以浅)的正压性较强;而 AE 具有显著斜压性,且存在亚中尺度过程。AE 两断面上层 $Ri < 0.25$ 的占比分别达 59.2% 和 48.6%,说明 STMW 所在层流场稳定性弱,易发生湍流混合。相较之下,CE 上层较难发生跨密度面混合。

本文基于实测资料探究了 KE 中下游一个中尺度涡对内部的运动学和水文特征。由于船载 ADCP 数据在垂向上观测范围的限制,未能获得全面的三维流场特征。同时,涡旋观测的时效性导致没能在涡旋内部同步实现生物化学观测,因此目前研究无法对该涡对的生物效应进行定量分析。

参考文献:

- [1] QIU B, CHEN S M. Variability of the kuroshio extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal time scales[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35(11): 2090-2103.
- [2] YANG Y, LIANG X S, QIU B, et al. On the decadal variability of the eddy kinetic energy in the Kuroshio extension[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(5): 1169-1187.
- [3] NAKANO H, ISHIKAWA I. Meridional shift of the Kuroshio Extension induced by response of recirculation gyre to decadal wind variations [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(13/14): 1111-1126.
- [4] 董迪. 基于卫星遥感和现场观测的黑潮延伸区中尺度涡旋研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
DONG D. Mesoscale eddies in the Kuroshio Extension Region from satellite and in-situ data [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [5] WHALEN C B, TALLEY L D, MACKINNON J A. Spatial and temporal variability of global ocean mixing inferred from Argo profiles [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(18): L18612.
- [6] WHALEN C B, MACKINNON J A, TALLEY L D. Large-scale impacts of the mesoscale environment on mixing from wind-driven internal waves[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(11): 842-847.
- [7] MA J, XU H M, DONG C M, et al. Atmospheric responses to oceanic eddies in the Kuroshio Extension region [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(13): 6313-6330.
- [8] MA X H, CHANG P, SARAVANAN R, et al. Distant influence of Kuroshio eddies on north Pacific weather patterns?[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 17785.
- [9] QIU B, CHEN S M. Eddy-mean flow interaction in the decadal modulating Kuroshio Extension system[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(13/14): 1098-1110.
- [10] YASUDA I. Hydrographic structure and variability in the Kuroshio-Oyashio transition area [J]. *Journal of Oceanography*, 2003, 59(4): 389-402.
- [11] ITOH S, YASUDA I. Water mass structure of warm and cold anticyclonic eddies in the western boundary region of the subarctic North Pacific [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(12): 2624-2642.
- [12] SUGIMOTO S, HANAWA K. Roles of SST anomalies on the wintertime turbulent heat fluxes in the Kuroshio-Oyashio confluence region: Influences of warm eddies detached from the Kuroshio extension [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(24): 6551-6561.
- [13] TATEBE H, YASUDA I. Seasonal axis migration of the upstream Kuroshio Extension associated with standing oscillations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106(C8): 16685-16692.
- [14] 胡冬, 陈希, 毛科峰, 等. 黑潮延伸体邻近区域中尺度涡特征统计分析[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(3): 497-511.
HU D, CHEN X, MAO K F, et al. Statistical characteristics of mesoscale eddies near the Kuroshio Extension region [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2018, 49(3): 497-511.
- [15] MARTIN A P, RICHARDS K J. Mechanisms for vertical nutrient transport within a North Atlantic mesoscale eddy [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(4/5): 757-773.
- [16] ZHANG X Y, ZHENG H, ZHU X H, et al. Anatomical study of the three-dimensional structure of a supercharged cold eddy generated in the Kuroshio Extension [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 1079178.
- [17] 李敏华, 程灵巧, 范锦晓, 等. 基于船载和遥感的黑潮延伸体海域典型强中尺度冷涡演变及结构分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2022, 44(1): 22-30.
LI M H, CHENG L Q, FAN J X, et al. Evolution and structural analysis of a typical strong mesoscale cold eddy in the Kuroshio extension area based on in-situ observation data and satellite remote sensing data [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2022, 44(1): 22-30.
- [18] NI Q B, ZHAI X M, WANG G H, et al. Widespread mesoscale dipoles in the global ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(10): e2020JC016479.

- [19] YANG Q, WANG G H, XU C, et al. The influence of cold filaments on the evolution of dipole structures [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1113993.
- [20] ZHANG Z W, TIAN J W, QIU B, et al. Observed 3D structure, generation, and dissipation of oceanic mesoscale eddies in the south China sea [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 24349.
- [21] CHELTON D B, SCHLAX M G, SAMELSON R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies [J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167-216.
- [22] NENCIOLI F, DONG C M, 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.
- [23] 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.
- [24] DONG C M, LIN X Y, LIU Y, et al. Three-dimensional oceanic eddy analysis in the Southern California Bight from a numerical product [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C7): C00H14.
- [25] 李等, 程灵巧, 严晨冰, 等. 基于2005~2019年卫星遥感观测的南大洋印度洋扇区中部涡旋特征分布研究 [J]. *海洋与湖沼*, 2022, 53(5): 1054-1066.
- LI D, CHENG L Q, YAN C B, et al. Characteristics of eddies in the central Indian sector of the Southern Ocean based on satellite observation from 2005 to 2019 [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2022, 53(5): 1054-1066.
- [26] JI J L, DONG C M, ZHANG B, et al. Oceanic eddy characteristics and generation mechanisms in the Kuroshio extension region [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(11): 8548-8567.
- [27] LIU Y J, ZHENG Q N, LI X F. Characteristics of global ocean abnormal mesoscale eddies derived from the fusion of sea surface height and temperature data by deep learning [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(17): e2021GL094772.
- [28] AGUEDJOU H M A, CHAIGNEAU A, DADOU I, et al. Imprint of mesoscale eddies on air-sea interaction in the tropical Atlantic ocean [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(12): 3087.
- [29] MASUZAWA J. Subtropical mode water [J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1969, 16(5): 463-472.
- [30] OKA E, NISHIKAWA H, SUGIMOTO S, et al. Subtropical Mode Water in a recent persisting Kuroshio large-meander period: part I-formation and advection over the entire distribution region [J]. *Journal of Oceanography*, 2021, 77(5): 781-795.
- [31] TALLEY L D. Distribution and formation of north Pacific intermediate water [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 23(3): 517-537.
- [32] YASUDA I. The origin of the North Pacific intermediate water [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C1): 893-909.
- [33] JOYCE T M, YASUDA I, HIROE Y, et al. Mixing in the meandering Kuroshio extension and the formation of North Pacific intermediate water [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106(C3): 4397-4404.
- [34] KOUKETSU S, KANEKO I, KAWANO T, et al. Changes of North Pacific Intermediate Water properties in the subtropical gyre [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(2): L02605.
- [35] OSAFUNE S, YASUDA I. Bidecadal variability in the intermediate waters of the northwestern subarctic Pacific and the Okhotsk Sea in relation to 18.6-year period nodal tidal cycle [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 111(C5): C05007.
- [36] FU L L, FLIERL G R. Nonlinear energy and enstrophy transfers in a realistically stratified ocean [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1980, 4(4): 219-246.
- [37] VAN AKEN H M, VAN VELDHoven A K, VETH C, et al. Observations of a young Agulhas ring, Astrid, during MARE in March 2000 [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(1): 167-195.

Analysis of the three dimensional structure of a typical dipole in the Kuroshio extension based on shipboard observation

LU Yuhui¹, CHENG Lingqiao¹, ZHANG Jun¹, CHEN Xinjun², WEI Yongliang¹

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to understand the active mesoscale processes in the Kuroshio extension (KE) region, and reveal the three-dimensional structure of mesoscale eddies in this region, as well as the contributions of mesoscale eddies to water mass redistribution and ocean-atmosphere interactions, based on shipboard observations and satellite remote sensing data, this study investigates the three-dimensional structural characteristics of a typical eddy dipole composed of cyclonic eddy (CE) and an anticyclonic eddy (AE) distributed on the north and south sides of the KE axis, respectively, during June-July 2022. Results show that the CE has a southward cross-frontal motion dominated by shear forcing, while the AE remains relatively stable. The "cold tongue" structure of the CE gradually diminishes due to sea surface warming and heat diffusion from the KE axis, with the AE exhibiting a "reverse eddy sea surface temperature anomaly" structure due to the entrainment of cold water carried by the CE. The vertical multi-cores of internal temperature and salinity anomalies in the eddy dipole are related to the vertical redistribution of water masses with different characteristics. The AE's internal flow field is strongly baroclinic, with around 50% of it having a Richardson number less than the critical value of 0.25, indicating a tendency for turbulent mixing. The upper layer of the CE is barotropic, hindering substantial diapycnal mixing. This study helps to enhance understanding of the eddy dipole characteristics and internal structure of eddies in the KE region, providing information for further research on eddy dynamics.

Key words: Kuroshio extension; mesoscale eddy dipole; evolution characteristics; three-dimensional structure