

西北太平洋副热带海区一个气旋涡的三维结构、运动学及其亚中尺度特征

方思敏¹, 林宏阳^{1,2}, 胡致远¹, 孙振宇^{1,2}, 杨龙奇¹, 胡建宇^{1,2*}

(1. 厦门大学海洋与地球学院, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361102;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519082)

摘要: 利用厦门大学“嘉庚”号科考船于 2019 年 3—4 月在西北太平洋副热带逆流区收集的现场观测数据, 结合卫星遥感资料与漂流浮标数据, 分析该区域一个气旋涡(编号 CE2)的三维结构、运动学及其亚中尺度特征. 结果表明: 1) CE2 涡旋在表层约呈椭圆形, 其影响范围随着深度的增大向北侧收缩, 最大影响深度约 400 m; 2) 热成风关系在 CE2 涡旋范围内存在显著的尺度依赖性; 3) 涡中心与边缘因亚中尺度过程活跃程度不同而呈现尺度依赖性动能和相反的动能波数谱特征; 4) 漂流浮标轨迹分析显示涡旋边缘存在明显的物质输运“泄漏”现象. 上述结果对传统中尺度涡旋现象进行了基于实测资料的观测补充.

关键词: 中尺度涡旋; 西北太平洋副热带逆流; 三维结构; 亚中尺度特征; 实测数据

中图分类号: P 717

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2023)03-0425-10

由于存在较强的斜压不稳定性, 北太平洋副热带逆流(STCC)区存在活跃的中尺度涡活动^[1]. 在整个北太平洋, STCC 区的涡动能仅次于黑潮延伸体区, 也是赤道太平洋与中纬度太平洋之间进行物质、热量以及盐量交换的主要区域^[2], 在局部乃至全球气候演变中都具有重要作用.

中尺度涡的三维结构、生消演变机制及其与平均流的相互作用等一直是涡旋研究的热点和难点问题. 对于 STCC 区, Kang 等^[3]利用 TOPEX/POSEIDON 测高数据来研究该区域的涡旋场, 通过对 1992—2007 年的数据研究发现速度切变对涡旋的产生以及涡旋的季节性演变有很大的影响; Hwang 等^[4]也使用 TOPEX/POSEIDON 测高数据来研究该区域的中尺度涡旋, 统计了涡旋的半径、中心、涡度、剪切变形率、拉伸变形率、散度和中心速度, 并对其中一个气旋涡和一个反气旋涡的传播过程进行了个例分析; Yang 等^[5]利用 1992—2002 年的卫星海面高度计资料研究了西北亚热带太平洋的中尺度涡特性; Cheng 等^[6]进一步应用卫星高度计

资料统计分析了西北太平洋中尺度涡旋的传播特征.

海洋中的亚中尺度现象是近年来海洋研究中的一个热点话题, 其多出现在海洋表层, 伴随亚中尺度过程生成的次级环流诱导混合层内发生再层化, 能有效地释放中尺度过程中的势能^[7-8]. 基于副热带太平洋现场观测数据, Callies 等^[9]发现亚中尺度范围内动能谱斜率不符合经典的准地转(QG)理论, 而冀承振等^[10]和 Yang 等^[11]则利用数模和实测数据研究发现中尺度涡旋边缘处动能谱斜率更趋近 k^{-2} (k 表示水平波数的量级^[9]), 可用表层 QG 理论解释; 而涡旋中心处动能谱斜率更趋近 k^{-3} , 符合 QG 理论, 表明涡旋边缘的亚中尺度过程活跃.

厦门大学于 2019 年 3—4 月用“嘉庚”号科考船在西北太平洋 STCC 区[图 1(a)]开展了 KK1902 航次调查, 主要观测若干中尺度涡, 并综合利用多种观测平台与设备进行拖曳、走航、大面等手段的全方位精细观测. 本研究利用该航次实测数据, 结合卫星高度计资料, 对航次重点观测的一个气旋涡(编号 CE2)的三维结构、运动学及其亚中尺度特征进行分析, 以期

收稿日期: 2022-10-05 录用日期: 2023-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(41730533, 91958203, 42076013)

*通信作者: hujy@xmu.edu.cn

引文格式: 方思敏, 林宏阳, 胡致远, 等. 西北太平洋副热带海区一个气旋涡的三维结构、运动学及其亚中尺度特征[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2023, 62(3): 425-434.

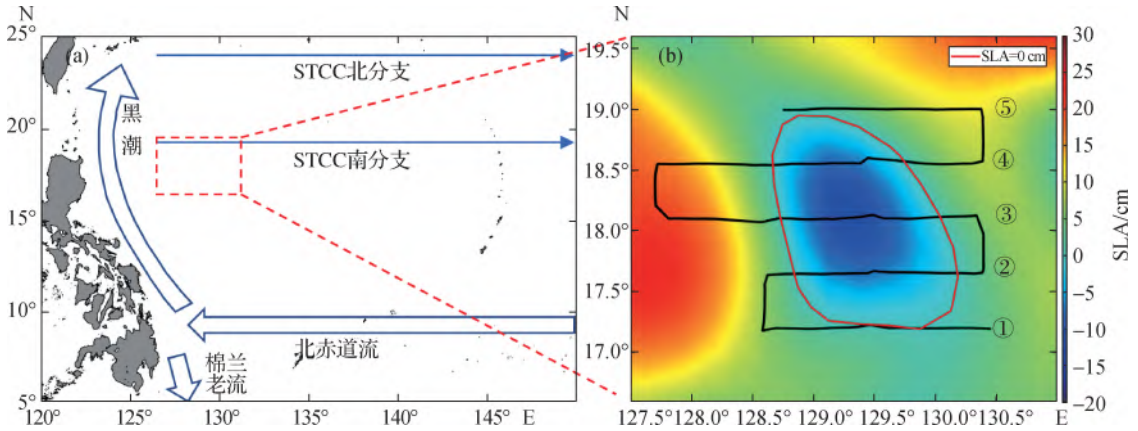
Citation: FANG S M, LIN H Y, HU Z Y, et al. Three-dimensional structures, kinematics and submesoscale characteristics of a cyclonic eddy in the subtropical region of Northwestern Pacific[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2023, 62(3): 425-434. (in Chinese)



增进对该区域中尺度涡旋及其亚中尺度特征的认识。

1 数据与方法

KK1902 航次于 2019 年 3 月 17 日至 4 月 18 日



(a)西北太平洋 STCC 区主要流系,根据 Cheng 等^[6]修改;(b)CE2 涡旋的观测断面,底图为 2019 年 3 月 30 日的海面高度异常(SLA),红线表示 SLA 为 0 cm 的等值线。

图 1 研究区域和所观测的气旋涡

Fig. 1 Research region and the observed eddy

温度、盐度、深度取自型号为 M12000 的拖曳式海洋多参数剖面测量仪(MVP, AML 公司),仪器电导率准确度达 ± 0.001 S/m,温度传感器的准确度达 ± 0.005 °C.实际采集数据深度为 0.99~504.33 m,相邻采样点之间的平均距离为 4.5 km,平均垂向采样间隔为 0.5 m,本研究的数据深度插值为 1~450 m,深度间隔为 0.5 m.

海流数据取自 OS38K 船载相控阵宽带走航式声学多普勒海流剖面仪与 TRDI WHMariner300K 船载走航式声学多普勒海流剖面仪(ADCP),两台仪器的数据采集频率分别为 38 与 300 kHz,下文中分别将两者简称为 ADCP38k 与 ADCP300k. ADCP38k 观测流速准确度达 ± 0.5 cm/s,实际采集数据深度为 45.4~429.4 m,数据垂向采样间隔为 24 m,空间平均后沿轨水平间隔为 2 km; ADCP300k 观测流速准确度达 ± 0.5 cm/s,实际采集数据深度为 9.7~69.7 m,数据垂向采样间隔为 2 m,空间平均后沿轨水平间隔为 500 m. ADCP38k 数据主要用于研究涡旋区海流分布,ADCP300k 数据主要用于表层动能谱计算.

卫星高度计数据取自哥白尼海洋环境监测中心(CMEMS)提供的 L4 级网格化产品,标识符 SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047,该产品

进行观测作业,全程共经过 7 个涡旋,其中气旋涡 CE2 涡旋的观测资料最为充分,观测时间为 2019 年 3 月 27 日至 4 月 1 日,包含①~⑤ 5 个纬向断面,观测期间另有一个反气旋涡伴生于 CE2 涡旋的西侧[图 1(b)].

包含 SLA 数据及地转流流速等变量,时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

KK1902 航次在研究区域投放了 12 个基于中国北斗卫星定位和通讯的 SUCE V2.1 型卫星跟踪表层漂流浮标,这些漂流浮标的 GPS 定位精度为 10 m,采样间隔标配 30 min,续航能力标配 6 个月,可观测的要素包括位置追踪、表层海流流速、流向等^[12].

2 温盐结构

2.1 水团特征

许建平^[13]曾利用 2002—2005 年的 Argo 浮标资料对西北太平洋水团性质进行分析,得出部分水团的性质,如表 1 所示.基于 MVP 观测数据(深度范围 0~450 m),绘制 CE2 涡旋的温-盐图并进行水团分析(图 2),所观测到的水团包含 NPSSW 和 NPSTW,并包含小部分 NPIW 的性质.

2.2 三维结构

利用 MVP 观测数据分析 CE2 涡旋的三维结构.航次期间共对 CE2 涡旋进行 5 个纬向断面的拖曳观测,从南到北分别标记为断面①~⑤.

表 1 西北太平洋部分水团性质^[13]

Tab. 1 Characteristics of some water masses in the Northwestern Pacific^[13]

水团名称	英文简写	温度范围/°C	盐度范围	深度范围/m
北太平洋热带表层水团	NPTSW	26.0~31.0	<34.4	<150
北太平洋次表层水团	NPSSW	19.0~25.0	34.9~35.1	100~200
北太平洋亚热带水团	NPSTW	14.0~18.0	34.5~34.8	100~250
北太平洋中层水团	NPIW	4.0~10.0	34.1~34.4	400~700

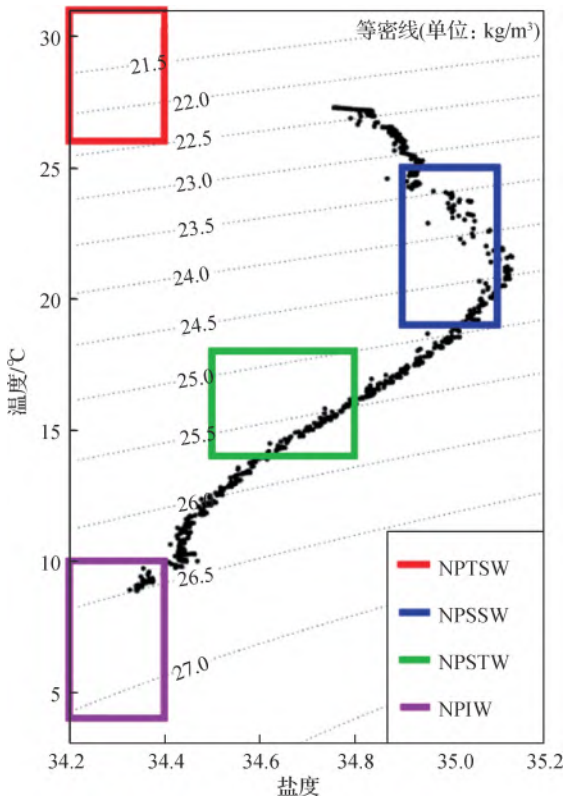


图 2 基于 MVP 拖曳观测的 CE2 涡旋温-盐图

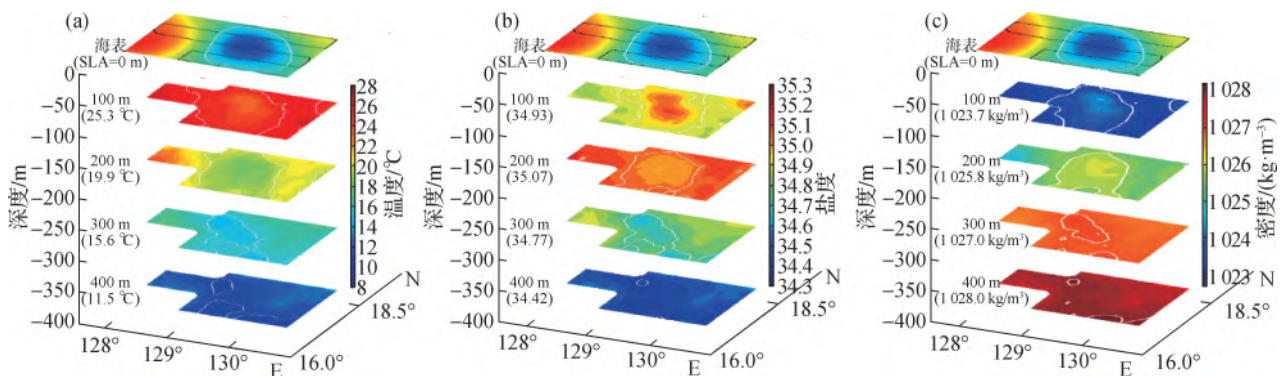
Fig. 2 Temperature-salinity diagram of the eddy CE2 based on MVP towed measurement

CE2 涡旋的温度与盐度大面分布在各深度均能较好对应. 在表层, 观测数据符合气旋涡低温高盐的特征; 由表及深, 涡旋范围内的温度持续降低, 盐度先升高后降低, 最高盐度分布在 150~250 m 深度范围内, 大致为 NPSSW 控制区. 根据各水层的温度与盐度值可计算出 CE2 涡旋在各深度的密度大面分布, 据此绘制 CE2 涡旋的温度、盐度、密度三维结构示意图(图 3). CE2 涡旋形状在表层呈长轴方向为西北—东南的椭圆, 在各深度能将温度、盐度、密度变化梯度较大的范围包裹住, 且与海表 SLA 为 0 m 的等值线形状范围较相似的等值线用白色标注. 从等值线的范围变化来看, 随着深度增大, 涡旋影响的范围显著减小; 到 300 m 层, 等值线不能保持与表层相似的形状和范围, 朝涡旋偏北侧收缩; 到 400 m 层, 等值线围成的封闭区域范围很小, 因此判断 CE2 涡旋最大影响深度应在 400 m 左右.

3 涡旋的运动学特征

3.1 涡旋的演变

航次观测仅能捕捉到 CE2 涡旋短暂的一个发展阶段, 借助卫星高度计资料则可以追踪 CE2 涡旋完整



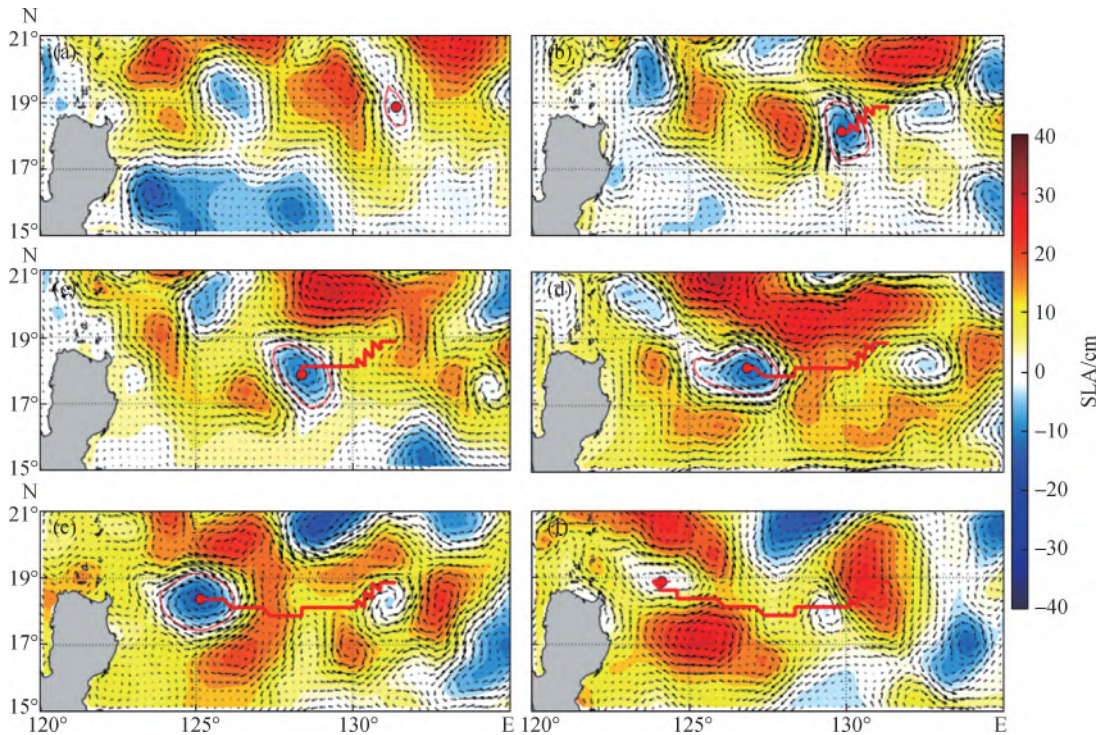
图中白色等值线(除海表为 SLA 分布外)对应的数值标注在对应深度下方的括号中.

图 3 CE2 涡旋温度(a)、盐度(b)和密度(c)的三维结构

Fig. 3 Three-dimensional structure of temperature (a), salinity (b) and density (c) of the eddy CE2

的传播轨迹与演变过程(图 4). 以涡旋内 SLA 最低点作为涡旋中心, 得到 3 月 3 日 CE2 涡旋形成于 131° E,

18.9° N 附近, 随后一路向西传播, 6 月 6 日最终消散于黑潮流轴附近(124° E, 18.9° N).



(a)3月3日;(b)3月22日;(c)4月10日;(d)4月29日;(e)5月18日;(f)6月6日. 图示为 SLA 分布及地转流异常矢量, 红色圆圈表示包围涡旋中心的 SLA 最外圈闭合等值线, 红色粗曲线为涡旋的移动轨迹.

图 4 CE2 涡旋的传播与演变

Fig. 4 Propagation and evolution of the eddy CE2

以包围涡旋中心的 SLA 最外圈闭合等值线表示涡旋影响的水平范围, 可以看到涡旋面积的变化: 3 月 3 日至 3 月 22 日涡旋面积明显增大; 3 月 22 日、4 月 10 日、4 月 29 日 3 个时间点的涡旋面积接近; 5 月 18 日的涡旋面积明显大于其余时间点; 发展到 6 月 6 日, 涡旋面积基本归零.

以涡旋中心的 SLA 大小指征涡旋强度, 得到涡旋在整个演变过程的强度变化(图 5), 即 SLA 绝对值越大涡旋越强, 反之涡旋越弱. CE2 涡旋在传播过程中经历了增强(3 月 3 日至 3 月 21 日)、稳定(3 月 21 日至 4 月 6 日)、衰退(4 月 6 日至 4 月 19 日)、再增强(4 月 19 日至 5 月 5 日)、最终衰退至消散(SLA 趋于 0)的阶段, SLA 较大的时间与其涡旋面积较大的时间基本对应. 在航次观测数据覆盖的时间段(3 月 27 日至 4 月 1 日), CE2 涡旋处于第一次增强后较稳定的阶段, 涡旋中心 SLA 的值约 -0.12 m. 传播过程中 CE2 涡旋经历了二次增强与减弱等较复杂的演变过程, 这很可能是 STCC 区活跃的涡旋活动导致 CE2 涡旋在传播过程中受到明显的涡-涡相互作用.

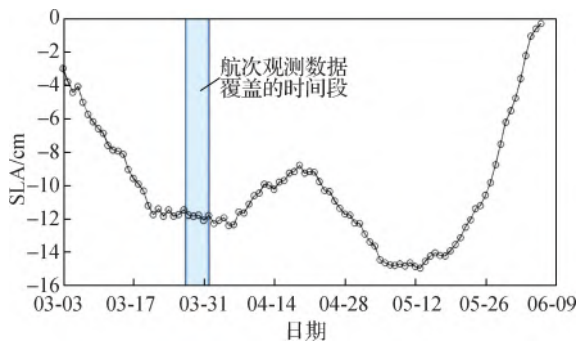


图 5 CE2 涡旋中心 SLA 随时间的变化

Fig. 5 Time variation of SLA at the center of the eddy CE2

3.2 流速分布

根据 ADCP38k 的数据对 CE2 涡旋的实测流速分布进行分析: 在深度 ≤ 200 m 的水层, CE2 涡旋各断面的实测速度矢量呈现清晰的逆时针分布, 沿涡旋边缘的切向流速随着深度的增加有所减少, 由 50 m 层的 0.6 m/s 减少到 200 m 层的 0.4 m/s(图 6). 在深度 ≤ 100 m 的水层, 断面②东侧海流呈偏东北方向; 到

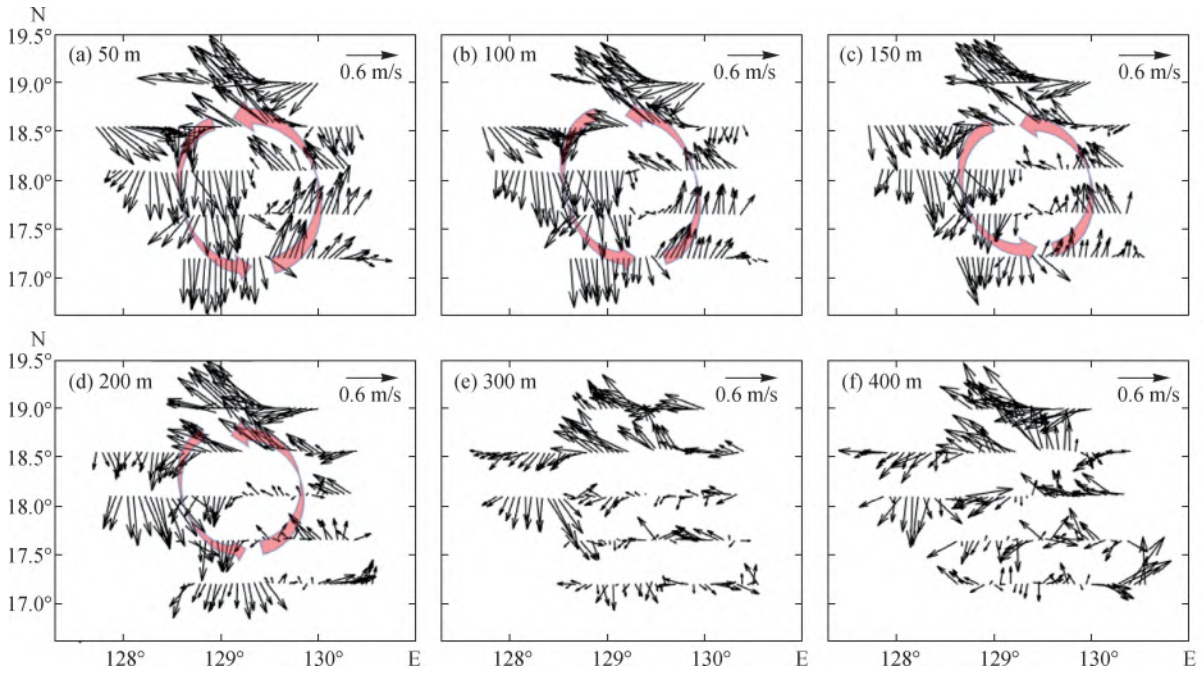


图6 CE2 涡旋不同深度实测流速矢量的平面分布

Fig. 6 Distributions of observed velocity vectors around the eddy CE2 at different depths

200 m 层,断面②东侧海流变为偏西北方向,且断面①东侧的北向流已不明显,可以看出由流速矢量构成的椭圆半径随着深度的增大而不断收缩.在深度 >200 m 的水层,断面④和⑤仍如浅层类似存在速度的南、北流向分界,但其他几个断面的流速矢量已难以看出明确的南、北流向分界点,流速矢量椭圆的中心向涡旋北侧偏移.

4 涡旋的亚中尺度特征

4.1 热成风关系的尺度依赖性

热成风关系 ($\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{g}{\rho_0 f} \frac{\partial \rho}{\partial x}$) 由地转平衡公式 ($-fv = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$) 和静力稳定公式 ($\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$) 推导得出,其中 p 为压强, ρ 为密度, ρ_0 为密度参考值(本研究取 1027 kg/m^3), v 为经向速度, z 为垂向距离, x 为纬向距离, f 为地转参数, g 为重力加速度.热成风关系可阐明海流垂向剪切与密度水平梯度之间的关系.对于大、中尺度运动而言,热成风关系一般成立;而亚中尺度、小尺度运动由于非线性作用增强,热成风关系一般不成立.

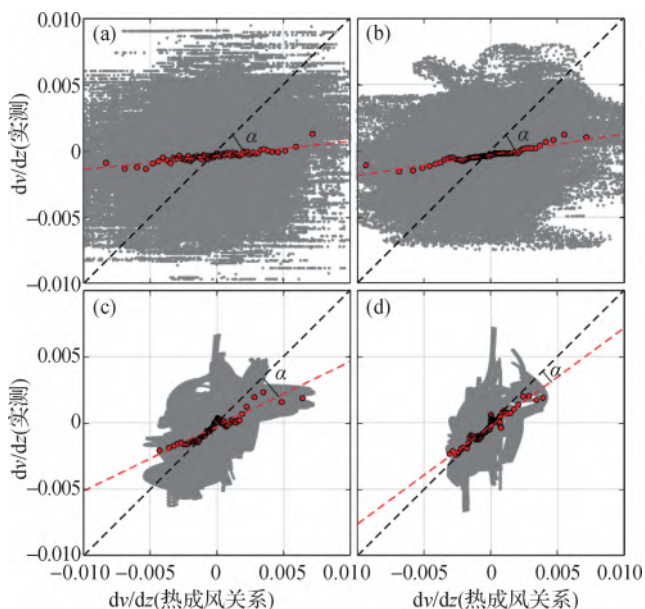
选取穿过涡旋中心的断面③进行研究.数据的垂向间隔均插值为 0.5 m ,首先计算 ADCP 测得的经向流速垂向剪切,再由 MVP 测得的纬向温盐断面根据热成风关系诊断得到经向流速垂向剪切,比较二者在

不同空间尺度下的结果.图 7 中黑色虚线表示流速严格遵循热成风关系,随着尺度增大,灰色散点逐渐向中心黑色虚线集中,基于散点线性拟合得到的红色虚线与黑色虚线之间的角度(以下表示为 $\angle\alpha$) 逐渐减小.原始数据的结果与 10 km 低通滤波后的结果相比, $\angle\alpha$ 变化不大,而低通滤波的截断波长从 10 km 增大到 50 km ,再增大到 100 km 后, $\angle\alpha$ 变化较明显;随着低通滤波尺度增大, $\angle\alpha$ 几乎每次减小为前一滤波尺度的 50% .实测流速满足热成风关系的程度具有明显的尺度依赖性,即大、中尺度的实际流速更符合热成风关系,与预期相符.

4.2 水平动能波数谱分析

水平动能波数谱通常被用于分析海水运动在不同尺度范围内的活跃程度.基于 ADCP300k 实测数据对涡旋边缘与涡旋中心的动能谱进行比较,研究过程中将 10 km 及以上尺度视为中尺度, 10 km 以下视为亚中尺度.

图 8(a)中黑线所示的中尺度动能在 $128.4^\circ, 128.9^\circ, 129.7^\circ, 130.1^\circ \text{ E}$ 附近存在峰值,说明中尺度运动在这些区域活跃;粉线所示的亚中尺度动能分布在 128.7° E 附近呈最高峰值,在 128.0° 与 130.1° E 附近也存在较高的峰值.在 129.4° E 附近,中尺度动能分布值较低,甚至趋近于零,亚中尺度动能也同样呈现低值.结合卫星高度计结果[图 8(b)],在断面③的动能谱分析中,取 $129.1^\circ \sim 129.6^\circ \text{ E}$ 为涡旋中心, $128.6^\circ \sim 129.1^\circ \text{ E}$



(a)原始流速;(b)10 km 低通滤波;(c)50 km 低通滤波;(d)100 km 低通滤波. 灰点表示所有样本,按横坐标从小到大排序;每 5 000 个点求平均用红色圆点表示,对红色圆点进行线性拟合呈现为红色虚线;黑色虚线表示横、纵坐标对角线.

图 7 不同尺度下 CE2 涡旋断面③实测流速满足热成风关系的程度

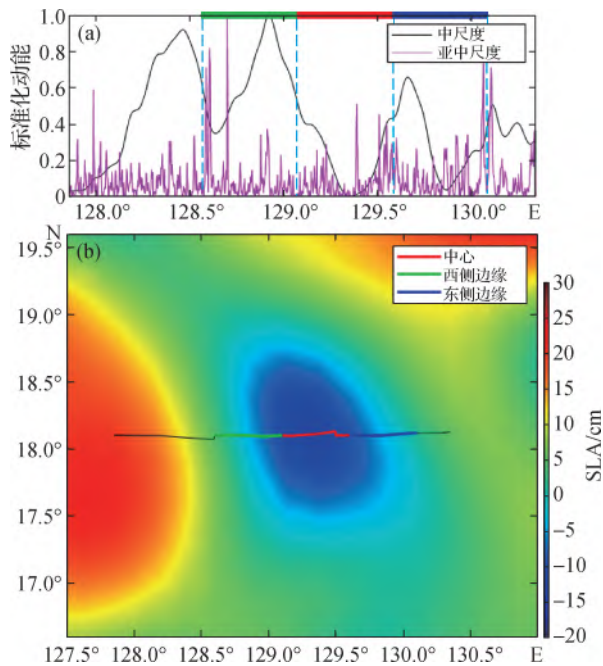
Fig. 7 Validity of thermal wind relation for observed velocities across section ③ of the eddy CE2 at different scales

为涡旋西侧边缘,129.6°~130.1° E 为涡旋东侧边缘.

由动能波数谱结果(图 9)可见,在大于 10 km 尺度范围,涡旋中心动能波数谱斜率接近 k^{-2} ,而涡旋边缘动能波数谱斜率则接近 k^{-3} ;在 1~10 km 尺度范围内,随着尺度的减小,涡旋中心动能波数谱偏离 k^{-2} 向上偏移,而涡旋边缘谱逐渐靠近 k^{-2} ,在较小的尺度范围内同样位于 k^{-2} 上方,边缘的谱斜率比中心的谱斜率更平缓;在约 1 km 尺度范围内,3 条动能波数谱斜率相似.

前人基于观测数据或模式结果均指出涡旋边缘亚中尺度过程比涡旋中心更活跃,涡旋中心动能波数谱斜率接近 k^{-3} ,而涡旋边缘动能波数谱斜率接近 k^{-2} [8-9]. 但本研究的动能波数谱分析结果显示涡旋中心的动能谱量值大于涡旋边缘,表明涡旋中心的亚中尺度动能方差比涡旋边缘大,与前人研究结果有所不同. 为此针对 CE2 涡旋尺度为 10 km 的动能分布结果进行探究,以验证上述研究过程的准确性.

CE2 涡旋边缘的原始动能高于涡旋中心[图 10 (a)],但在 10 km 尺度上,涡旋中心的动能更大,变化幅度也更大[图 10(b)],即 CE2 涡旋中心的原始总动能比边缘的小,但涡旋中心动能在亚中尺度范围内的



(a)垂直平均动能分布 ($\bar{u} = \frac{1}{z} \int u dz, E = \frac{1}{2} \bar{u}^2 + \frac{1}{2} \bar{v}^2$, 其中 u 为纬向速度, \bar{u} 为垂直平均纬向速度, \bar{v} 为垂直平均经向速度, E 为垂直平均动能); (b)区域划分结果. 图中所示动能为 9.7~69.7 m 的垂直平均;(a)顶部粗线表示涡旋分区.

图 8 CE2 涡旋断面③边缘、中心区的垂直平均动能分布
Fig. 8 Depth-averaged kinetic energy distributions at periphery and core zones of the eddy CE2 along section ③

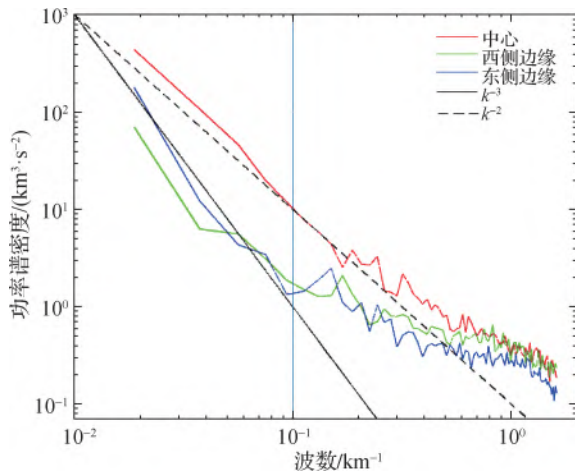


图 9 CE2 涡旋断面③的水平动能波数谱
Fig. 9 Wavenumber spectra of horizontal kinetic energy for the eddy CE2 along section ③

活跃程度与涡旋边缘相似甚至更强,与动能谱分析结果一致. 这确实与大多数基于高分辨率数值模拟结果得到的结论不同,但对于观测的 CE2 涡旋来说,基于该航次数据的另一项研究[14]可以证实,有一个涡丝入

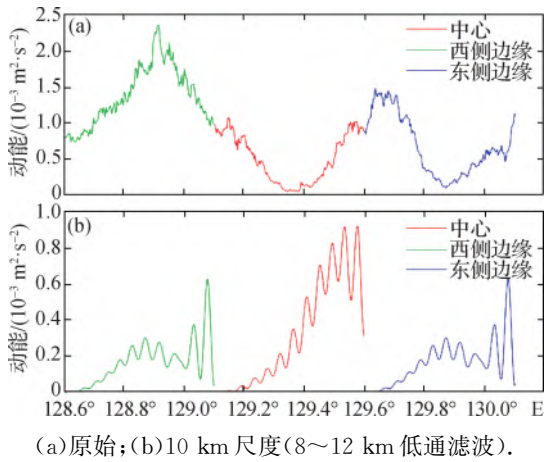


图 10 CE2 涡旋断面③的动能分布
Fig. 10 Distribution of kinetic energy for the eddy CE2 along section ③

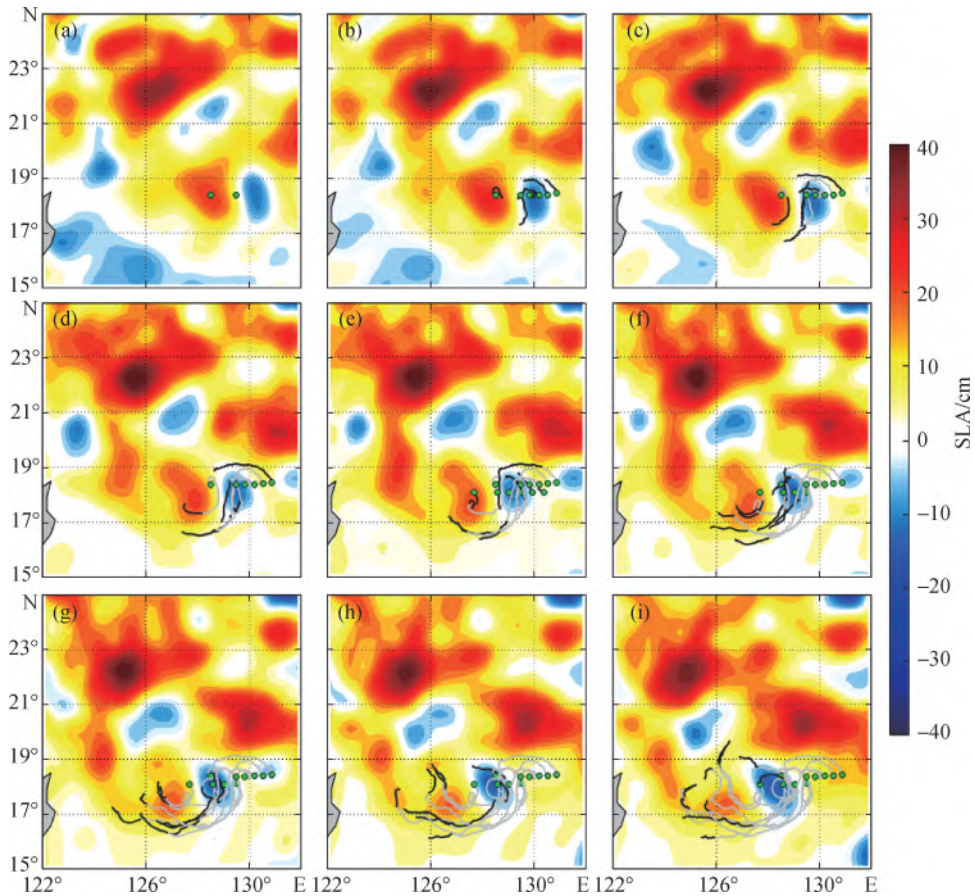
侵到该涡旋的核心区,造成涡旋中心存在较大的密度梯度(诊断发现涡旋中心锋生函数的量值较大),导致涡旋中心存在活跃的亚中尺度活动。

上述动能谱结果也表明,描述真实海洋中的中尺度涡及其相关的亚中尺度过程不能简单地建立“涡中心-涡边缘”的框架进行分析,而应基于更具动力学意义的诊断量(如锋生函数)进行涡旋范围内的中尺度-亚中尺度过程分析。

4.3 涡旋的边缘“泄漏”现象

前人研究认为中尺度涡由于非线性作用可以携带水体进行长距离运输^[15],近年来随着观测和数值模拟分辨率的提高,亚中尺度过程及其效应逐步被解析。有研究发现,中尺度涡在向西移动过程中伴随明显的水体“泄漏”,可能受到涡旋边缘活跃的亚中尺度过程的影响^[16];也有研究将此“泄漏”现象归因于中尺度涡的离心率^[17],但目前还缺乏明确的观测证据。KK1902 航次有 12 个表层漂流浮标被投放在 CE2 涡旋范围内,可用于涡旋物质运输与水体携带能力的研究。

如图 11 所示:在投放初期(约一周内),漂流浮标还能大致跟随着涡旋背景环流围绕 CE2 涡旋中心移



(a)3月17日;(b)3月20日;(c)3月23日;(d)3月26日;(e)3月29日;(f)4月1日;(g)4月4日;(h)4月7日;(i)4月10日。底图为对应标示日期的 SLA 分布,绿点表示漂流浮标初始投放位置,浅灰色线表示历史轨迹,黑线表示对应标示日期近 3 d 的轨迹。

图 11 CE2 涡旋的内漂流浮标轨迹

Fig. 11 Trajectories of internal drifters around the eddy CE2

动,但这种准圆周运动并不能维持很久.对于西侧的反气旋涡或是东侧的 CE2 涡旋,没有一个漂流浮标能绕着涡旋中心完成一个完整的绕圈运动,绝大多数漂流浮标绕涡旋中心移动不到半个圆周便被“甩出”既定的等高线.这些漂流浮标轨迹从观测上证实了中尺度涡在西传过程中,涡旋范围内的水体存在明显的“泄漏”,这可能会影响前人基于涡旋是封闭水体这一假设估算的涡致水体输运结果^[15].

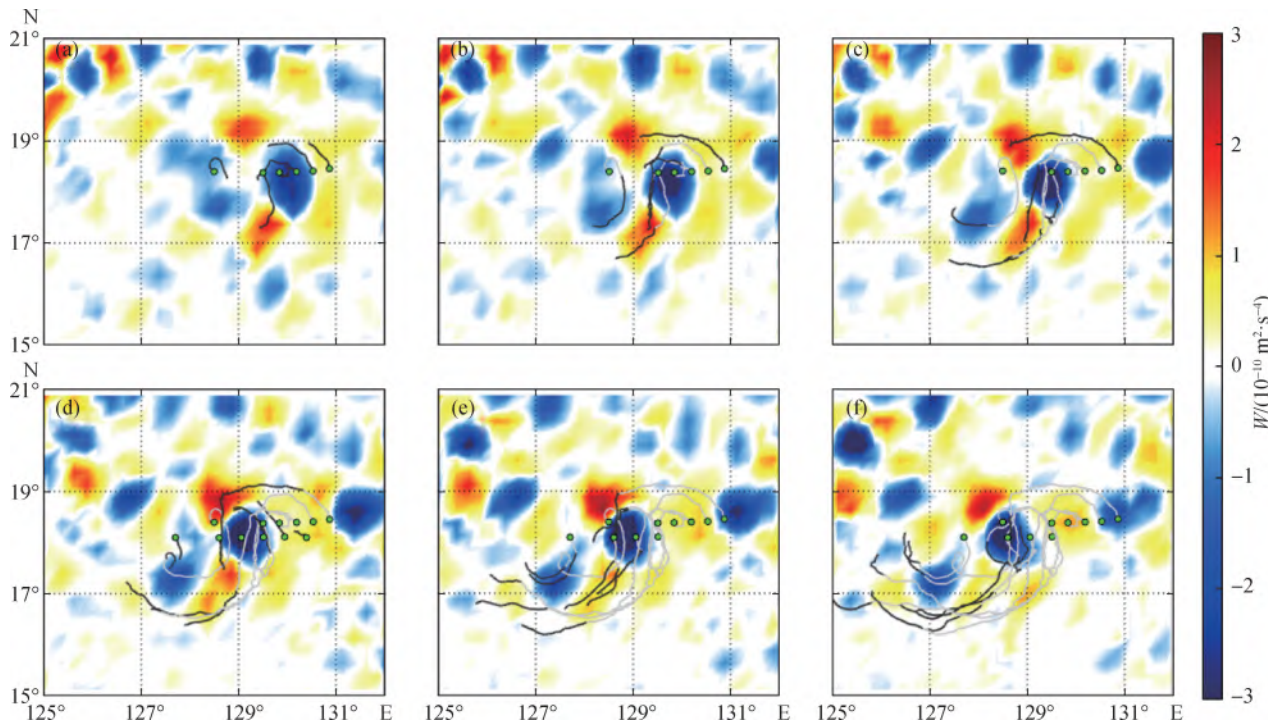
本研究尝试用漂流浮标数据研究中尺度涡输运的“泄漏”现象是否与涡旋边缘的亚中尺度过程有关.Okubo-Weiss 参数可作为亚中尺度过程是否活跃的一个重要诊断量^[18],计算公式为 $W = \sigma_n^2 + \sigma_s^2 - \omega^2$,其中涡度 $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ (y 为径向距离),垂向应变 $\sigma_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$,水平应变 $\sigma_s = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$. $W > 0$ 的区域对应流场中主要由水平变形拉伸控制的区域,而 $W < 0$ 的区域则对应涡旋控制区域^[19-20].

水平拉伸率由卫星高度计地转流计算得到,结果表明 CE2 涡旋附近的水平拉伸率为负,CE2 涡旋与其西侧反气旋涡中间区域的南、北侧水平拉伸率为正且幅值较大(图 12).随着涡旋的向西移动,水平拉伸率

的幅值大小有所变化,但总体分布无太大变化.大部分漂流浮标的轨迹在 CE2 涡旋区域内均比较光滑,而在 CE2 涡旋与西侧反气旋涡之间偏南侧的高拉伸区则呈现部分卷曲状,可能是受该区域活跃的亚中尺度活动影响所致.

5 结论与讨论

本研究使用 KK1902 航次实测数据与卫星高度计资料重点分析了位于西太平洋 STCC 区的气旋涡 CE2,研究其三维结构、运动学与亚中尺度特征,得到如下结论:CE2 涡旋的温盐分布表现出典型的气旋式涡旋结构,涡旋最大影响深度约 400 m,航次观测期间 CE2 涡旋处于第一次增强后的稳定阶段.CE2 涡旋的实测流速满足热成风关系的程度具有较明显的尺度依赖性,大、中尺度流速更符合热成风关系,而亚中尺度及更小尺度范围内流速则因受非地转运动的影响更偏离热成风关系.动能波数谱分析结果表明,CE2 涡旋中心与边缘的亚中尺度运动均较活跃.漂流浮标的结果表明中尺度涡内表层水体在进行长距离输运的过程中可能会发生“泄漏”,中尺度涡裹挟物质进行输运的能力可能比原估计的更弱.



(a)3月20日;(b)3月23日;(c)3月26日;(d)3月29日;(e)4月1日;(f)4月4日.

底图为对应标示日期的水平拉伸率,其他标注说明同图 11.

图 12 CE2 涡旋附近基于高度计数据计算的拉伸率及漂流浮标轨迹

Fig. 12 Altimetry-based strain rate superimposed with drifter trajectories around eddy CE2

本研究以大量实测数据为基础进行分析,但也受到实测数据的诸多限制,如在三维结构研究中未能体现涡旋的全水深结构,动能波数谱分析受限于观测断面长度等。前人普遍将 20 km 尺度作为亚中尺度与中尺度运动的分界,且中尺度运动的定义能达到 100 km 的量级,因此对亚中尺度动能波数谱斜率的观察还有待完善。实测数据虽具有较大局限性,但在海洋研究中却不可缺少。由于本研究结论基于特定涡旋的实测资料分析而得,其普适性仍有待后续更多观测资料的验证。

参考文献:

- [1] QIU B. Seasonal eddy field modulation of the North Pacific Subtropical Countercurrent: TOPEX/Poseidon observations and theory [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1999, 29(10): 2471-2486.
- [2] MCCREARY J, LU P. Interaction between the subtropical and equatorial ocean circulations: the subtropical cell[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, 24(2): 466-497.
- [3] KANG L, WANG F, CHEN Y L. Eddy generation and evolution in the North Pacific Subtropical Countercurrent (NPSC) zone [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(5): 968-973.
- [4] HWANG C, WU C R, KAO R. TOPEX/Poseidon observations of mesoscale eddies over the Subtropical Countercurrent: kinematic characteristics of an anticyclonic eddy and a cyclonic eddy [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C8): C08013.
- [5] YANG G, WANG F, LI Y L, 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] CHENG Y H, HO C R, ZHENG Q A, et al. Statistical features of eddies approaching the Kuroshio east of Taiwan Island and Luzon Island [J]. *Journal of Oceanography*, 2017, 73(4): 427-438.
- [7] CAPET X, MCWILLIAMS J C, MOLEMAKER M J, et al. Mesoscale to submesoscale transition in the California current system. Part I: flow structure, eddy flux, and observational tests [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, 38(1): 29-43.
- [8] MCWILLIAMS J C. Submesoscale currents in the ocean [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2016, 472 (2189): 20160117.
- [9] CALLIES J, FERRARI R. Interpreting energy and tracer spectra of upper-ocean turbulence in the submesoscale range (1-200 km) [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(11): 2456-2474.
- [10] 冀承振, 叶瑞杰, 董济海, 等. 南海中尺度涡边缘亚中尺度过程模式研究 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(1): 1-6.
- [11] YANG Q X, ZHAO W, LIANG X F, et al. Elevated mixing in the periphery of mesoscale eddies in the South China Sea [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(4): 895-907.
- [12] SUN Z Y, HU J Y, CHEN Z Z, et al. A strong Kuroshio intrusion into the South China Sea and its accompanying cold-core anticyclonic eddy in winter 2020—2021 [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(14): 2645.
- [13] 许建平, 刘增宏, 孙朝辉, 等. 利用 Argo 剖面浮标研究西北太平洋环流和水团 [C] // 中国首届 Argo 科学研讨会. 杭州: 中华人民共和国科学技术部, 国家海洋局, 2006: 1-15.
- [14] HU Z D, LIN H Y, LIU Z Y, et al. Observations of a filamentous intrusion and vigorous submesoscale turbulence within a cyclonic mesoscale eddy [J/OL]. *Journal of Physical Oceanography*. [2023-03-31]. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-22-0189.1>.
- [15] ZHANG Z G, WANG W, QIU B. Oceanic mass transport by mesoscale eddies [J]. *Science*, 2014, 345(6194): 322-324.
- [16] HAZA A C, ÖZGÖKMEN T M, HOGAN P. Impact of submesoscales on surface material distribution in a gulf of Mexico mesoscale eddy [J]. *Ocean Modelling*, 2016, 107: 28-47.
- [17] CETINA-HEREDIA P, ROUGHAN M, VAN SEBILLE E, et al. Retention and leakage of water by mesoscale eddies in the East Australian Current system [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(4): 2485-2500.
- [18] LAPEYRE G, KLEIN P, HUA B L. Does the tracer gradient vector align with the strain eigenvectors in 2D turbulence? [J]. *Physics of Fluids*, 1999, 11(12): 3729-3737.
- [19] LEGAL C, KLEIN P, TREGUIER A M, et al. Diagnosis of the vertical motions in a mesoscale stirring region [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37(5): 1413-1424.
- [20] HU J Y, GAN J P, SUN Z Y, et al. Observed three-dimensional structure of a cold eddy in the southwestern South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C5): C05016.

Three-dimensional structures, kinematics and submesoscale characteristics of a cyclonic eddy in the subtropical region of Northwestern Pacific

FANG Simin¹, LIN Hongyang^{1,2}, HU Zhiyuan¹, SUN Zhenyu^{1,2}, YANG Longqi¹, HU Jianyu^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai 519082, China)

Abstract: From March to April in 2019, a research cruise targeted on observing mesoscale eddies was carried out onboard R/V TAN KAH KEE in the Subtropical Countercurrent area of the Northwestern Pacific. Using these *in-situ* measurements, together with satellite remote sensing and drifter trajectory data, this paper describes the three-dimensional structures, kinematics and submesoscale characteristics of a sampled cyclonic eddy (i. e. eddy CE2) in the studied regions. Main findings of this study are as follows: 1) The shape of eddy CE2 is approximately oval at sea surface, and the eddy influencing area shrinks to the northern part of the eddy as the depth increases. The maximum influence depth of eddy CE2 is about 400 m. 2) The validity of the thermal wind relationship exhibits a clear scale dependence. 3) Due to the differences in the activity degree of submesoscale processes, the scale-dependent kinetic energy and its wavenumber spectra display contrasting features between the eddy core and eddy peripheries. 4) Analysis of drifter trajectories showed significant material leakage from the inside of the eddy is observed during eddy propagation based on analysis of drifter trajectories. Based on the above measured data, the phenomena of mesoscale eddies in the traditional theory are supplemented.

Keywords: mesoscale eddy; Northwestern Pacific Subtropical Countercurrent; three-dimensional structure; submesoscale characteristic; *in-situ* data

(责任编辑:徐婷婷)