

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*

李 等¹ 程灵巧^{1, 2, 3} 严晨冰¹ 张春玲^{1, 2, 3} 胡 松^{1, 2, 3}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院 上海 201306; 2. 上海海洋大学海洋科学与技术实验教学示范中心 上海 201306;
3. 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室 上海 201306)

摘要 在南大洋印度洋扇区中部海域,除了地形控制(凯尔盖朗高台),南极绕极流和厄加勒斯回流的汇合流进一步加强了下游的斜压剪切强度,导致涡旋能量显著增强,因此,对该海域涡旋的研究有助于了解该海域的涡旋特征以及地形与涡旋的分布关系。基于 2005~2019 年卫星遥感数据,对该海域涡旋特征进行统计,并对涡旋产生地分布、跨锋面涡旋的移动状况进行分析,同时结合 Argo 剖面数据,进一步剖析涡旋内部水文分布特征。结果表明:该海域涡旋生命周期多在 20 d 以内(64.25%),平均半径多在 30~100 km(96.13%);平均半径与平均振幅呈正相关关系(相关系数 $R=0.55$);生命周期越大的涡旋平均传播距离也越大。2014 年开始涡旋数量明显增加,主要由短寿命涡旋(<30 d)数量增加所贡献。反之,21 世纪 10 年代后期年平均涡动能异常呈减小趋势。涡旋产生地随着寿命增长,逐渐从亚南极锋与南极绕极流南部边界之间的锋面区域向亚南极锋以北移动。跨锋面涡旋中,暖涡向高纬,冷涡向低纬移动,大部分具有携带水团移动的能力。由涡旋内部水文特征分析结果可知,不同极性的涡旋能够实现完全不同来源水团的远距离输送,对同一来源水团,气旋涡具有抬升作用,而反气旋涡具有压沉作用。该研究工作有助于提升对南大洋涡旋特征及变动的认识,为进一步的涡旋动力研究提供支撑。

关键词 凯尔盖朗; 海洋涡旋; 统计特征; 跨锋面涡旋; 垂直结构

中图分类号 P728.1; P731.1 **doi:** 10.11693/hyhz20220100005

南大洋是世界上涡旋活动最活跃的海域之一(Fu *et al.*, 2010)。显著的涡旋活动影响该海域南极绕极流(Antarctic circumpolar current, ACC)的动量平衡和经向翻转环流的物质输送(Sabu *et al.*, 2015)。在南大洋上层海洋没有强经向流的情况下,涡旋被认为是横跨纬向 ACC 实现经向热量、营养物质和碳交换的主要机制(Sallée *et al.*, 2008; Ito *et al.*, 2010)。同时,沿着 ACC 流轴方向分布着几支显著的海洋锋面,从北到南主要包括了亚南极锋(subantarctic front, SAF),极锋(polar front, PF),南极绕极流南锋(Southern Antarctic circumpolar current front, SACCF)和南极绕极流南部

边界(southern boundary of the ACC, SBdy)。这些锋面被认为与涡旋具有强烈的相互作用关系,且与这些锋面相关的涡旋携带有较强的涡能量(Gille, 1994; Morrow *et al.*, 1994; Hughes, 1995; Hughes *et al.*, 2001; Sokolov *et al.*, 2002)。一方面,涡旋具有成锋作用,涡旋的外围常会有锋面;另一方面,锋面由于不稳定性可以产生涡旋(郑全安等, 1988; 郭炳火等, 1995, 1997; 李立等, 1997)。在这些锋面区域,海流速度快且向东流动,而在锋面之间的区域,流动由涡旋主导,可以呈现任意方向(Talley *et al.*, 2011)。

南大洋的显著地形特征会影响 ACC 的结构和输

* 国家自然科学基金, 42176012 号, 42130402 号; 国家重点研发计划子课题, 2021YFC3101702 号。李 等, 硕士研究生, E-mail: dengkl1929@163.com

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

收稿日期: 2022-01-04, 收修改稿日期: 2022-03-04

送, 增强涡旋混合, 并导致主要地形特征下游的涡动能(eddy kinetic energy, EKE)增强(Lu *et al*, 2010; Thompson *et al*, 2012; Frenger *et al*, 2015)。凯尔盖朗高台是 ACC 区域中最突出的海底地形之一(图 1), 其西北-东南的走向几乎与 ACC 垂直, 对 ACC 的动力学有重要影响作用(Webb, 1993; Gille, 1997)。厄加勒斯流是南印度洋副热带环流中的西边界流, 沿着南非东侧海岸向西南流动, 直到与南非大陆分离, 在南非大陆南端离开大陆并进而向东反曲(林霞等, 2016)。厄加勒斯海流的大部分体积通过厄加勒斯回流返回印度洋(Civel-Mazens *et al*, 2021)。因此, 在南大洋印度洋扇区中部海域, 除了地形控制, ACC 和厄加勒斯回流的汇合流进一步加强了下游的斜压剪切强度, 进而导致涡旋能量显著增强(Morrow *et al*, 1992; Park *et al*, 1993)。

根据 2009 年 TRACK (transport across the Kerguelen Plateau)航次以及关于在凯尔盖朗-阿姆斯

特丹通道的地转运输估算, ACC 输运中约 60% (约 $150 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) 经过凯尔盖朗北部海区, 主要与 SAF 有关; 剩下 40% 穿过凯尔盖朗与南极洲之间, 其中大部分(约 $43 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) 与 SACCF 相关, 并集中在福恩海槽中(Park *et al*, 1993, 2009, 2014)。凯尔盖朗使 ACC 北部锋面, 即 SAF, 往低纬度的高能量、暖而咸的厄加勒斯回流和邻近的副热带锋方向偏转(Wang *et al*, 2016)。这些洋流的汇合导致凯尔盖朗下游的不稳定性和大量中尺度涡旋的存在, 随后导致强烈的混合和较高的生物生产力(Gille, 1997; Jayne *et al*, 2002; Fu, 2009; Lu *et al*, 2010; Sallée *et al*, 2011; Waterman *et al*, 2013; Gille *et al*, 2014; Rosso *et al*, 2014)。前人对印度洋扇区涡旋的研究大多集中在 35°S 以北(Jia *et al*, 2011; Delman *et al*, 2018), 而对凯尔盖朗高台的研究主要有: 史久新等(2002)研究了凯尔盖朗海台区的流场结构及季节变化; Wang 等(2016)研究了凯尔盖朗海台对海洋环流的影响; Kostianoy 等(2004)、Park 等

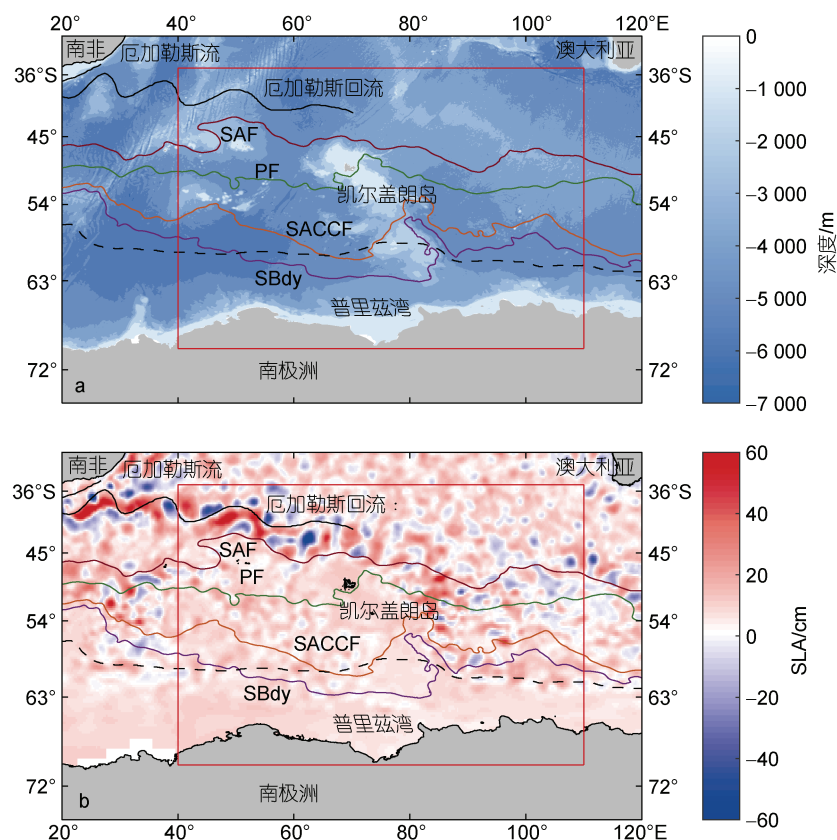


图 1 研究区域地形(a)以及 2019 年 1 月 1 日海表面高度异常(sea level anomaly, SLA)分布(b)

Fig.1 Topography of the study area (a) and sea level anomaly (SLA, b) distribution on January 1, 2019 provided by AVISO
注: 锋面从北到南分别包括了亚南极锋(subantarctic front, SAF; 暗红色实线)、极锋(polar front, PF; 绿色实线)、南极绕极流南锋(southern Antarctic circumpolar current front, SACCF; 橘红色实线)和南极绕极流南部边界(Southern Boundary of the ACC, SBdy; 紫色实线); 厄加勒斯流和厄加勒斯回流位置(黑色实线)参考 De Ruijter 等(2005); 黑色虚线表示 2005~2019 年平均冰缘线, 即 15%海冰密集度线, 数据来自 CMEMS (copernicus.eu), 分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$; 红色框为研究区域($40^\circ \sim 110^\circ\text{E}$, $70^\circ \sim 35^\circ\text{S}$)

(2014)对凯尔盖朗高台的锋面进行了相关研究,没有对该区域的涡旋进行统计分析。由于凯尔盖朗高台是ACC区域显著地形之一,且四个主要锋面在此分布,涡旋与锋面关系密切,因此,掌握凯尔盖朗区域涡旋的参数,分布特征以及涡旋与锋面的关系对进一步理解该海域海洋动力结构特征具有重要意义。

因此,本文基于2005~2019年的AVISO (archiving, validation and interpretation of satellite oceanographic data)卫星高度计融合数据,对南大洋印度洋扇区中部凯尔盖朗高台周围的涡旋进行探测与追踪,结合该区域EKE分布,分析涡旋的数量、不同生命周期涡旋数量的多年变化,跨锋面涡旋的地理分布及其物理性质。同时,结合Argo剖面数据以案例分析的形式初步探究涡旋对该海域海洋内部水文结构的影响。

1 数据和方法

1.1 数据

本文研究所用数据来自AVISO,该资料由Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, T/P, ENVISAT, GFO, ERS1/2卫星高度计数据融合而成。本文主要采用了海表面高度异常(sea level anomaly, SLA),海表面地转绝对流速(U , V)和地转流速异常(u' , v')。其中,SLA是基于1993~2012年期间平均海平面计算所得,地转流速异常(u' , v')则基于地转关系,由SLA计算获得:

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

其中, h' 为SLA(单位:m), g 为重力加速度(单位: m/s^2), f 为科氏参数(单位: $1/\text{s}$)。本文采用的数据时间分辨率为1d,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。研究区域为凯尔盖朗群岛及其周边海域($40^\circ \sim 110^\circ \text{E}$, $70^\circ \sim 35^\circ \text{S}$),时间范围为2005年1月1日至2019年12月31日。在进行涡旋探测、追踪以及计算涡动能之前将数据线性插值为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。

本研究所使用的锋面数据[即亚南极锋(subantarctic front, SAF),极锋(polar front, PF),南极绕极流南锋(Southern Antarctic circumpolar current front, SACCF)和南极绕极流南部边界(southern boundary of the ACC, SBdy)的位置数据]来自<https://doi.org/10.17882/59800>。

此外,本文从Argo (<http://www.argo.net>)数据集中分别提取了4组在本研究海域内同一时期相近冷涡和暖涡内部或影响范围内的剖面数据(表1),进行自海表到近2000dbar深度的水文结构特征对比。

表1 选用Argo剖面信息
Tab.1 Information of Argo profiles

组别	Argo 编号	剖面序号	经度	纬度	日期/年-月-日
1	D1901410	005	74.54°E	43.52°S	2010-03-04
	D1901407	005	77.36°E	44.72°S	2010-03-05
2	D5901480	078	57.04°E	42.92°S	2010-04-13
	D1900760	111	50.32°E	40.50°S	2010-04-14
3	D4901016	135	64.92°E	42.49°S	2012-09-09
	D5901494	165	68.55°E	41.68°S	2012-09-10
4	D5901482	211	50.58°E	39.91°S	2013-12-19
	D3901008	103	47.27°E	39.56°S	2013-12-20

1.2 方法

本文采用的涡旋自动探测和追踪方法由Nencioli等(2010)提出。该方法根据流场的几何特征来定义涡旋,已经被广泛应用在多个海域(Chen *et al*, 2011; Dong *et al*, 2012)。首先,识别涡旋中心的约束条件包括了:(1)沿涡旋中心点东西方向上,经向速度分量 v' 在远离中心点的两侧数值符号相反,大小随距中心点的距离线性增加;(2)沿涡旋中心点南北方向上,纬向速度分量 u' 在远离中心点的两侧数值符号相反,大小随距中心点的距离线性增加;(3)在选定区域内找到速度最小值点近似为涡旋中心;(4)在近似涡旋中心点附近,速度矢量的旋转方向必须一致,即2个相邻的速度矢量方向必须位于同一个象限或相邻的2个象限。针对前两个约束条件,本文首先对纬向轴线(东-西)上的速度 v' 分量符号相反的连续点,分析远离其5个格点 v' 分量的符号和大小,仅 v' 符号相反且大小增加的连续点可初步表征为涡旋。满足这些条件之后,分析经向轴线上符号相反的 u' 分量连续点,同样也是在单侧5个格点上进行分析,这些点的 u' 值符号必须与同一点上的 v' 分量在纬向变化的旋转方向一致。满足前两个条件之后,沿给定点的纬向和经向,移动 ± 5 个网格点,设定的网格区域大小为 11×11 ,寻找局域流速最小值。最后分析最小值区域边界上的速度矢量,由经向和纬向上距离速度最小值点的第4个网格点确定,范围为 9×9 网格区域,由于方向变化的连续性,任一矢量与其前一个矢量位于同一象限或在逆时针方向的临近象限,当搜索区域边界上所有矢量均满足这一条件时,围绕速度最小值点的周围矢量场会有一个闭合环流,因此,这一点被记为涡旋中心(董昌明, 2015)。

确定好涡旋中心后,通过求中心点局域范围内的流函数来判定最外的封闭流线为涡旋的边界。边界

上的点到涡旋中心点的平均距离定义为涡旋的半径大小。在 $t+1$ 时刻寻找与 t 时刻最相近、极性相同的涡旋来实现对涡旋的追踪(董昌明等, 2017)。由于本文数据时间分辨率为 1 d, 所以涡旋探测的时间间隔为 1 d, 即某 1 d 相对于前 1 d 对涡旋进行追踪。相对于某 1 d (t 时刻)涡旋的中心位置, 假设第 2 d ($t+1$ 时刻)检测到与 t 时刻相同类型涡旋的新位置, 如果新中心位于以 t 时刻所在位置为中心 1 km 为半径的区域内, 则认为两者属于同一个涡旋; 如果在 $t+1$ 时刻的对应区域内未发现相应涡旋, 则需要进行第二次搜索: 在 $t+2$ 时刻的扩大区域, 即 t 时刻所在位置为中心 1.5 km 为半径的区域范围内进行搜索, 如果在 $t+2$ 时刻仍未发现涡旋, 则认为涡旋已消散。

基于地转流速异常进行 EKE 的计算:

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

涡旋强度(eddy intensity, EI), 表示涡旋内部平均的 EKE, 其计算公式为(Chaigneau *et al.*, 2008)

$$EI = \frac{\overline{EKE}}{\pi r^2}. \quad (3)$$

此外, 基于绝对地转流速数据计算非线性参数(定义 $\beta = \bar{u}/c$), 其中, $\bar{u}$ 表示涡旋内部绝对地转流速的平均值, c 表示涡旋的平移速度。通过判断 β 的值来确定涡旋的移动是否是线性的, 当 $\beta > 1$ 时, 说明具有被限制在涡旋内部的流体存在, 该涡旋可以携带水团进行移动(Chelton *et al.*, 2007)。

2 结果

2.1 涡旋数量及涡动能

由于本文所使用时间分辨率为 1 d 的卫星数据是插值所得, 因此, 为了避免该部分误差, 只针对生命周期大于 7 d 的涡旋进行统计分析。通过自动探测方法对涡旋进行追踪, 结果显示 2005~2019 年间在本研究区域共检测到 24 793 个生命周期大于 7 d、振幅大于 2 cm 的显著涡旋(表 2), 其中共有 12 371 个气旋式涡旋(cyclonic eddy, CE), 占涡旋总个数的 49.9%, 12 422 个反气旋式涡旋(Anticyclonic Eddy, AE), 占比为 50.1%。从表 2 可知, 生命周期为 20 d 之内的涡旋数量最多(占比 64.25%), 且随着生命周期的增长, 涡旋数量逐渐减少。与之相反, 涡旋对应的平均半径、平均振幅和平均传播距离都随着生命周期的增长而变大。

EKE 能够反映涡旋所携带动能情况。图 2a 中多年平均 EKE 空间分布显示, EKE 高值($>400 \text{ cm}^2/\text{s}^2$)主

要集中在厄加勒斯回流及凯尔盖朗高台的下游区域, 从西往东逐渐向高纬偏转。从与锋面位置关系的角度来看, 在 80°E 西侧 EKE 高值区基本分布在 SAF 以北海域, 而在其东侧 EKE 高值区向高纬延伸到 SAF 和 SBdy 之间。整个研究区域的多年平均 EKE 为 $173.5 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, EKE 月平均和年平均异常在多年均值附近振荡, 其中月平均异常存在明显的周期性(图 2b): EKE 极小值一般出现在年初, 极大值集中在 8~10 月间, 以 10 月最多。结合 EKE 功谱图可知(图 2c), 其功率对应 365 d 和 182.6 d 存在显著峰值, 说明其具有 1 年和半年周期变动规律, 很好地解释了月平均 EKE 异常周期性振荡的特点。年平均 EKE 异常(图 2b 红线)长期变动在 2015 年前没有显著规律, 从 2015 年开始呈现单向降低趋势。分别基于 CE 与 AE 的 15 a 平均个数, 求得两者的年数量异常(图 2d)。结果显示, 两者数量多年变化呈现显著年际变化特征, 在 2014 年之前, 除 2008~2011 年之外, CE 和 AE 数量基本低于多年均值; 在 2014 年以后, 两种涡旋数量整体变多, 都高于多年均值。因此, 在 21 世纪 10 年代后期涡旋数量变化与 EKE 异常长期变动基本呈相反趋势。Duan 等(2016)曾在南大洋太平洋扇区发现涡旋数量增加的时期不一定与 EKE 增加的时期相对应。Lamont 等(2020)在研究爱德华王子岛附近涡旋分布时也发现 EKE 增加与涡旋数量增加没有较好的对应关系。

表 2 2005~2019 年间研究区域中不同生命周期区间内的涡旋个数, 以及对应的平均半径、平均振幅和平均传播距离

Tab.2 Lifespan, number of eddies, the corresponded mean radius, and propagation distance in the study region from 2005 to 2019

生命周期 T/d	CE 数/ 个	AE 数/ 个	平均半径 /km	平均振幅 /cm	平均传播距离 /km
$7 < T \leq 20$	7 665	8 265	46.72 ± 13.88	5.62 ± 3.86	38.75
$20 < T \leq 30$	2 034	2 066	49.24 ± 12.89	6.56 ± 4.53	66.67
$30 < T \leq 40$	979	933	50.53 ± 12.94	7.27 ± 4.97	87.54
$40 < T \leq 50$	575	475	51.38 ± 12.80	7.76 ± 5.54	108.53
$50 < T \leq 60$	351	261	51.78 ± 12.59	7.80 ± 5.38	121.96
$60 < T \leq 80$	336	225	52.20 ± 12.07	8.34 ± 5.68	150.89
$80 < T \leq 446$	431	197	52.22 ± 11.28	8.70 ± 5.80	254.33

注: 误差部分代表一个标准差; CE 表示气旋式涡旋(cyclonic eddy, CE), AE 表示反气旋式涡旋(Anticyclonic Eddy, AE)

接着, 我们将涡旋划分为与表 2 一样的 7 个生命周期(T)区间进行时间序列分析, 观察不同生命周期涡旋的数量变化情况。结合表 2 和图 3 可以看出, 在

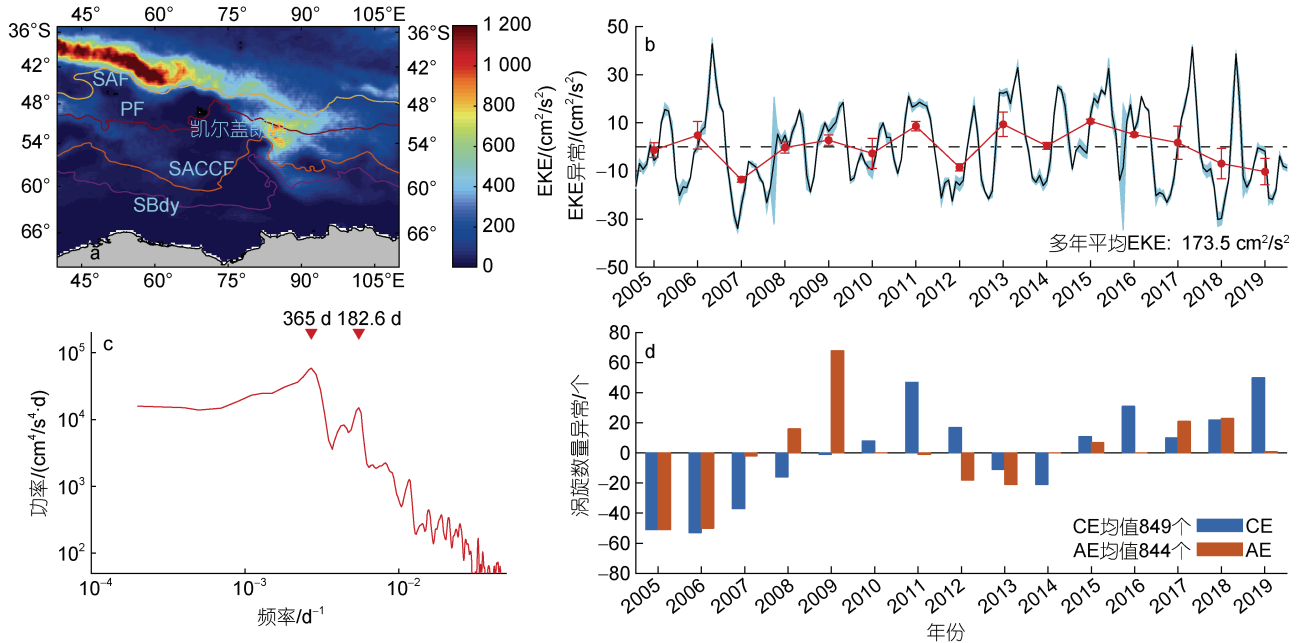


图2 2005~2019年间平均涡动能(eddy kinetic energy, EKE)空间分布(a), 月平均 EKE 异常(黑实线)及其标准差范围(浅蓝色)时间序列, 年平均 EKE 异常以及标准差(红线)(b), 日平均 EKE 功谱图(c), 涡旋数量年异常值(d)

Fig.2 Spatial distribution of mean EKE between 2005 and 2019 (a), time series of monthly mean EKE anomaly (black line) and its standard deviation range (light blue), annual EKE anomaly and its standard deviation (red line) (b), power spectrum of daily EKE (c), anomalies of annual eddy number (d)

注: a 中锋面从北到南分别表示亚南极锋(subantarctic front, SAF; 黄色实线)、极锋(polar front, PF; 暗红色实线)、南极绕极流南锋(southern Antarctic circumpolar current front, SACCF; 橘红色实线)和南极绕极流南部边界(Southern Boundary of the ACC, SBdy; 紫色实线); d 中 CE 表示气旋式涡旋(cyclonic eddy, CE); AE 表示反气旋式涡旋(Anticyclonic Eddy, AE); c 中红色三角处标注的数字分别表示在 365 和 182.6 天存在显著峰值

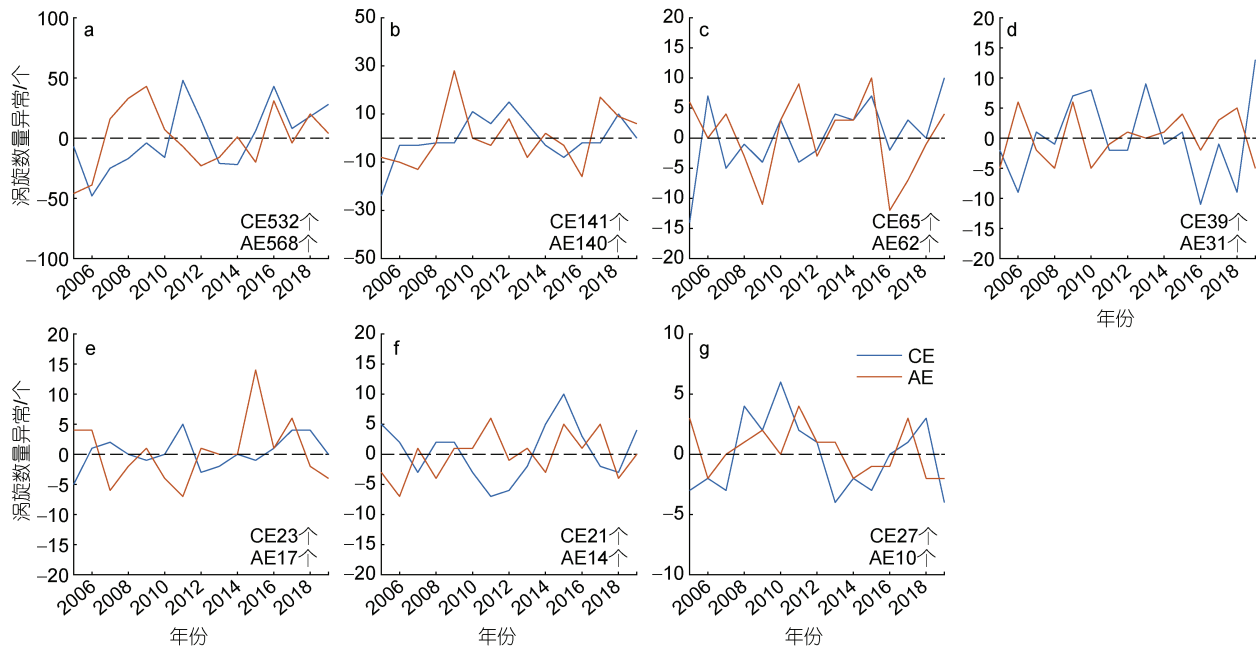


图3 在不同生命周期(T)的涡旋数量异常时间序列

Fig.3 Time series of annual anomalies of eddy number in different life cycles T

注: 黑色虚线表示异常值为 0; CE 和 AE 标注的数字表示该生命周期涡旋数量的多年平均值; a: $7\text{ d} < T \leq 20\text{ d}$; b: $20\text{ d} < T \leq 30\text{ d}$; c: $30\text{ d} < T \leq 40\text{ d}$; d: $40\text{ d} < T \leq 50\text{ d}$; e: $50\text{ d} < T \leq 60\text{ d}$; f: $60\text{ d} < T \leq 80\text{ d}$; g: $80\text{ d} < T \leq 446\text{ d}$

该海域内大多数涡旋 T 短于 30 d, 其中 T 在 20 d 以内的涡旋数量最多(占总涡旋数量的 64.25%)。对比图 3a 和图 2d 发现, T 在 20 d 以内的涡旋数量年变化与总涡旋数量年变化基本一致; $7\text{ d} < T \leq 20\text{ d}$ 和 $20\text{ d} < T \leq 30\text{ d}$ 内的涡旋数量在 15 a 的时间跨度内呈整体增加趋势。相较之下, 更大生命周期的涡旋数量基本在多年均值上下振荡, 并不具有明显的单向变化特征, 其中, T 大于 80 d 的涡旋在 2012 年之后反而出现明显低值。因此可知, 在 15 a 间不同生命周期涡旋数量变化规律各不相同, 短生命周期在整体数量增加上贡献最大。同时对比不同生命周期的 CE 和 AE 多年数量平均发现, T 短于 20 d 的涡旋中, AE 数量大于 CE 数量; 而在 T 大于 20 d 的各个区间中, CE 数量都比 AE 数量大。这与 Frenger 等(2015)⁷⁴²⁷ 的结果一致, 即在南大洋短生命周期的涡旋与长生命周期的涡旋极性分布相反, 短生命周期涡旋数量 AE 多于 CE, 长生命周期涡旋数量反之。他们认为, ACC 区域的 CE 倾向于表现出更大的 EKE, 而 AE 能量更有可能在海-

气相互作用、涡旋与周围环境相互作用过程中耗散, 使得其存活时间比 CE 短。

生命周期在 20 d 之内的涡旋数量最多, 且生命周期在 30 d 之内和大于 30 d 的涡旋数量年变化存在显著不同, 因此, 将生命周期划分为 $7\text{ d} < T \leq 20\text{ d}$ 、 $20\text{ d} < T \leq 30\text{ d}$ 、 $30\text{ d} < T \leq 80\text{ d}$ 和 $80\text{ d} < T \leq 446\text{ d}$ 区间, 对涡旋产生地的占比进行分析(图 4)。结果发现, $7\text{ d} < T \leq 20\text{ d}$ 的涡旋中有 56.82% 产生在 SAF 和 SBdy 之间的锋面区域, 主要集中在凯尔盖朗高台东侧下游区域(图 4a); $20\text{ d} < T \leq 30\text{ d}$ 之间的涡旋产生自 SAF 以北的占比明显增多, 但仍有 48.07% 产生在 SAF 和 SBdy 之间(图 4b); $30\text{ d} < T \leq 80\text{ d}$ 之间的涡旋, 部分生成自 SAF 和 SBdy 之间的锋面区域, 更有多于一半(57.51%) 产生自 SAF 以北海域(图 4c); 而生命周期大于 80 d 的涡旋产生地主要分布在 SAF 以北海域, 占比达到 85.35% (图 4d)。由此可知, 不同生命周期涡旋产生地存在显著差异, 随着寿命的增长, 其产生地有逐渐向 SAF 以北移动的趋势。

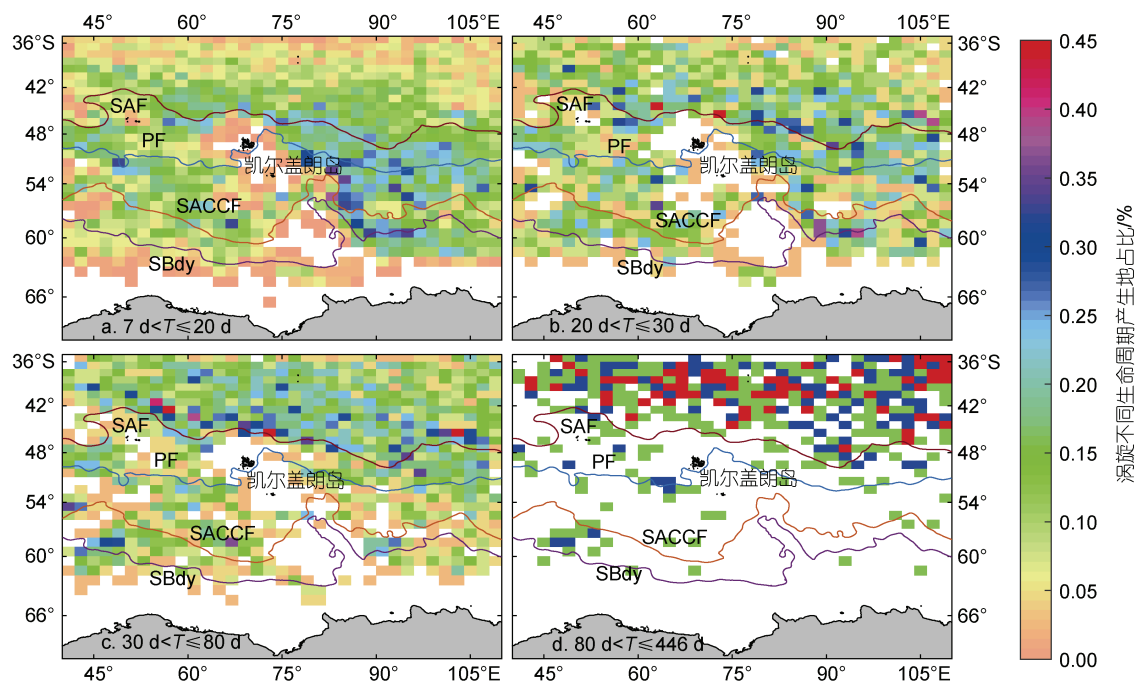


图 4 不同生命周期(T)的涡旋产生地分布占比

Fig.4 Grid distributions of eddy generation ratio in different life cycles T

注: 白色区域表示没有相应涡旋生成; 网格大小为 $2^\circ \times 1^\circ$; 锋面从北到南分别是亚南极锋(subantarctic front, SAF; 暗红色实线)、极锋(polar front, PF; 蓝色实线)、南极绕极流南锋(southern Antarctic circumpolar current front, SACCF; 橘红色实线)和南极绕极流南部边界(Southern Boundary of the ACC, SBdy; 紫色实线)

通过上述分析可知, 本研究区域内不同生命周期的涡旋具有不同的年数量变化及产生地分布特征。这驱使我们进一步对不同生命周期涡旋对应的半径、

振幅、传播距离、非线性参数(β)和强度特征进行全面分析(图 5)。涡旋平均半径(单个涡旋在其生命周期内的平均半径)在 30~100 km 之间的占比达到 96.13%,

且平均半径越大的涡旋具有更大的平均振幅(图 5a), 两者具有显著线性正相关关系, 对应相关系数 $R=0.55$ ($P<0.01$); 长生命周期($T>80$ d)涡旋对应的平均半径基本集中在 30~100 km 内, 其中最长寿命涡旋($T>300$ d)拥有 40~60 km 之间的平均半径, 之后更大平均半径的涡旋不再具有长寿命特点; 同时, 平均半径在 30~100 km 之间的长寿命涡旋能够传播更远距离(图

5b)。此外, 具有非线性的涡旋($\beta>1$)有效占比为 58.57% (去除没有移动的涡旋), 与生命周期没有特定对应关系(图 5c); 涡旋强度(EI)在平均半径-生命周期坐标域中的分布特征并不显著(图 5d), 但是统计发现尽管 $EI>0.1$ (cm^2/s^2)/ km^2 的较强强度涡旋个数占比仅为 4.58%, 但是其 91.63% 的平均半径在 30~100 km 之间, 即对应生命周期较大的区间内。

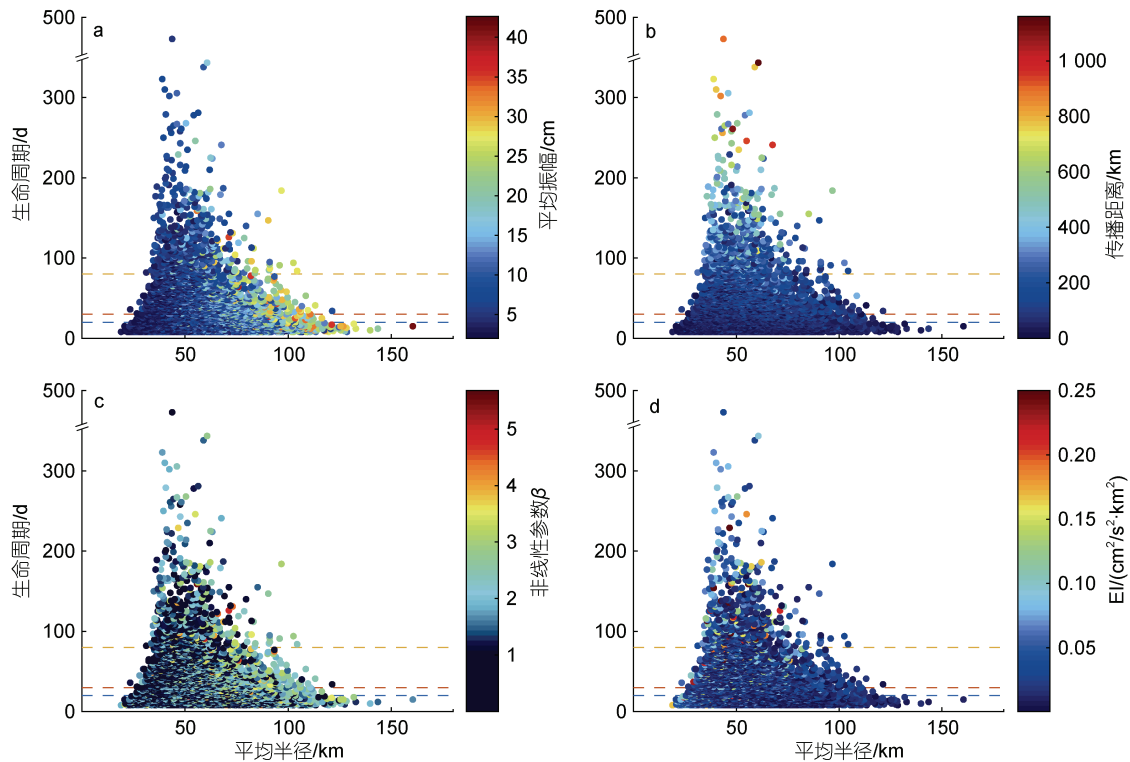


图 5 涡旋生命周期内的平均半径、生命周期与平均振幅(a)、传播距离(b)、 β (c)及涡旋强度(EI, d)方面的对应关系

Fig.5 Relationships of average radius during eddy life cycle and life cycle to the average amplitude (a), propagation distance (b), β (c), and eddy intensity (d)

注: 其中, 蓝色、橙色和黄色虚线分别表示生命周期为 20、30、80 d; 生命周期大于 300 d 的涡旋个数较少, 因此, 对纵坐标进行缩短处理

胡冬等(2017)曾统计得到南印度洋涡旋半径多集中在 40~100 km。Duan 等(2016)³¹对南大洋太平洋扇区涡旋进行统计, 发现多于 90% 的涡旋半径在 40~110 km, 涡旋振幅在 2~30 cm 范围内, 振幅峰值为 2~8 cm。Cotroneo 等(2013)对新西兰南部的冷涡进行追踪, 获得其平均半径为 52.5 km。Swart 等(2008)对西南印度洋脊的涡旋进行统计, 发现其半径在 60~90 km 之间。因此, 本研究区域涡旋统计特征结果符合南大洋涡旋基本情况。

2.2 跨锋面涡旋分布

南大洋海域存在强劲的锋面系统, 锋面与涡旋关系密切。为了认识涡旋在经向跨锋面物质能量输送方面的作用, 有必要对该部分涡旋进行识别追踪。因

此, 本章节基于锋面的位置分布, 对研究海域内 2005~2019 年间生命周期大于 7 d, 振幅大于 2 cm 的跨锋面涡旋进行特性解析。由图 6a 可以看出, 跨锋面涡旋普遍存在于每条锋面处, 并且在凯尔盖朗高台下游跨锋面涡旋数量达到最大(白色区域, 沿着锋面每隔 5° 纬向区间统计获得)。图 6b 显示了跨锋面涡旋中 CE 和 AE 的个数分布情况。高纬向跨锋面涡旋中, AE 的数量多于 CE, 且高纬向 AE 数量在所有类别中占绝对优势; 而低纬向移动的涡旋中, 所有锋面处 CE 数量均多于 AE, 其中 PF 处达到最多。

为了更细致地探讨跨锋面涡旋的移动轨迹, 分别绘制了涡旋跨越不同锋面的相对移动轨迹(图 7), 发现不同锋面处涡旋的移动轨迹各有特点。首先, 相

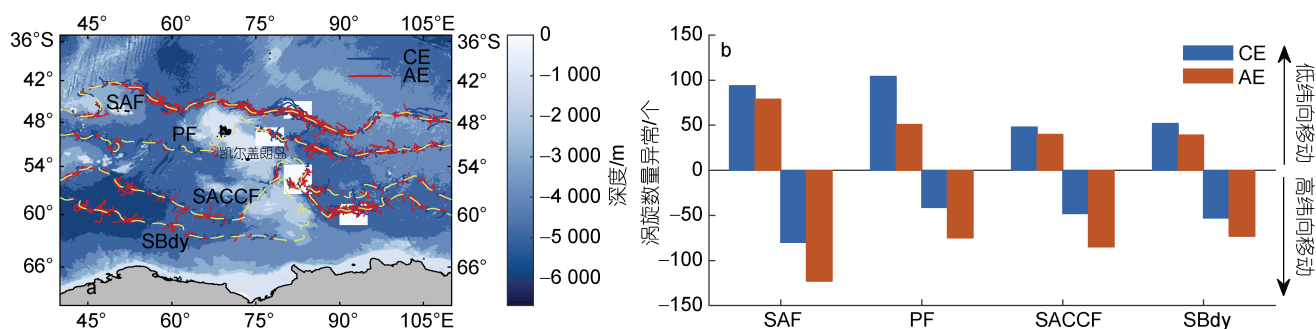


图 6 跨锋面涡旋的地理位置、移动轨迹(a)以及跨各锋面涡旋数量统计(b)

Fig.6 Geographical location and moving track of cross frontal eddies (a), and the number of cross frontal eddies (b) at each front
 注: a 中白色矩形表示对应跨锋面涡旋产生地个数最多的区域, 即沿着锋面每隔 5°纬向区间计算的涡旋个数最多的部分; 黄色虚线从北到南(由上至下)分别表示亚南极锋(subantarctic front, SAF)、极锋(polar front, PF)、南极绕极流南锋(southern Antarctic circumpolar current front, SACCf)和南极绕极流南部边界(Southern Boundary of the ACC, SBdy); CE 表示气旋式涡旋(cyclonic eddy, CE); AE 表示反气旋式涡旋(Anticyclonic Eddy, AE)

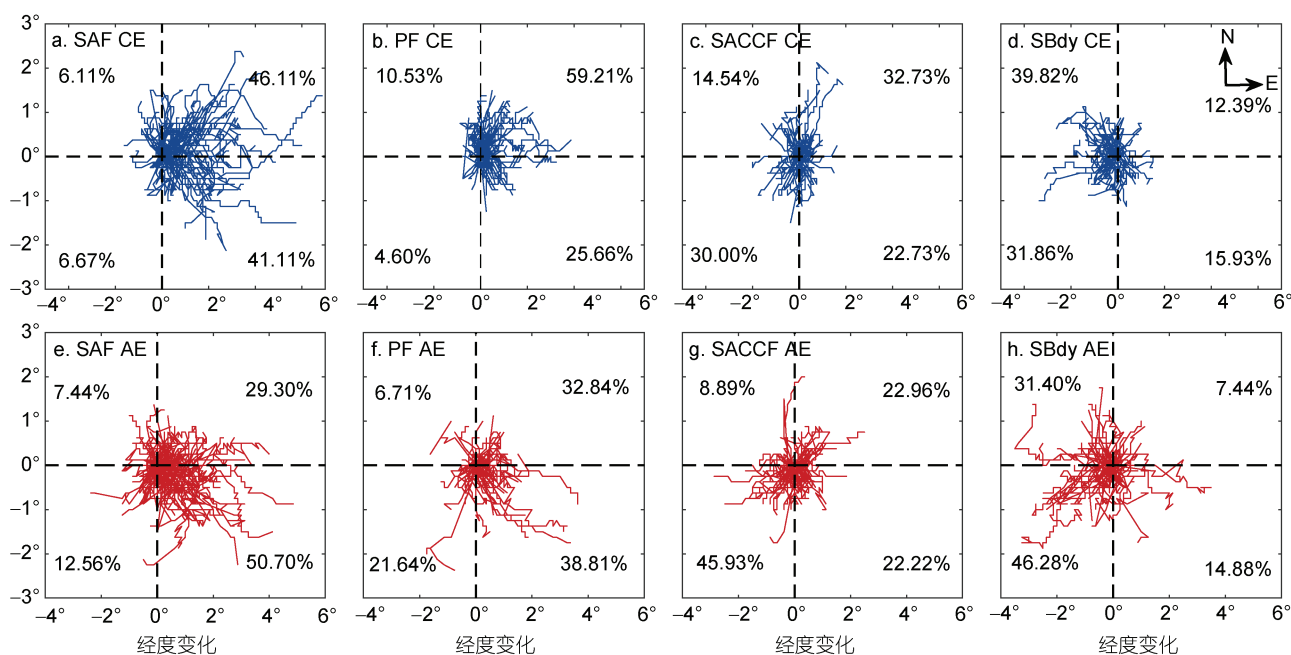


图 7 跨锋面涡旋相对移动轨迹

Fig.7 Trajectories of relative movement of cross frontal eddies

注: 百分比代表不同象限方向的涡旋个数占比; 横坐标的 0°表示跨锋面涡旋(图 6a 中涡旋)的产生地经度, 纵坐标的 0°表示跨锋面的涡旋(图 6a 中涡旋)的产生地纬度, 即坐标原点(0°, 0°)表示跨锋面涡旋产生地

对较北的两个锋面 SAF 和 PF 处, CE 往东北方向移动的个数占比最多, AE 往东南方向移动的个数占比最多(图 7a, 7b, 7e 和 7f)。其中, 长距离传播(>2°)的涡旋中 CE 基本往东向移动, 而 AE 大多往东南方向移动。在 SACCf 处, 东北向 CE 和西南向 AE 占比最多(图 7c 和 7g); 而在最南边的 SBdy 处, 西北向移动的 CE 和西南向移动的 AE 个数占比最多(图 7d 和 7h)。这 4 个锋面走向不尽相同, 所处的地形环境各异, 可能导致了不同的锋面处涡旋移动方向的不同特点, 整体

上从北往南有由东向转为西向的趋势。

对所有跨锋面涡旋的各性质取日平均, 并在生命周期尺度上进行分析(图 8)。结果显示, 跨锋面涡旋平均半径大部分在 40~50 km 之间(图 8a), 在该研究区域中属于中等偏小水平(对比图 5a)。涡旋的平均振幅多在 5~15 cm 之间变动, 其中 10 cm 以上涡旋基本为 CE 类型(图 8b), 且这些拥有较大平均振幅的 CE 拥有较强的 EI 及 β (图 8c 和 8d)。整体来看, 大部分 CE 的 EI 都比 AE 的强, 同时多数涡旋无论是 CE

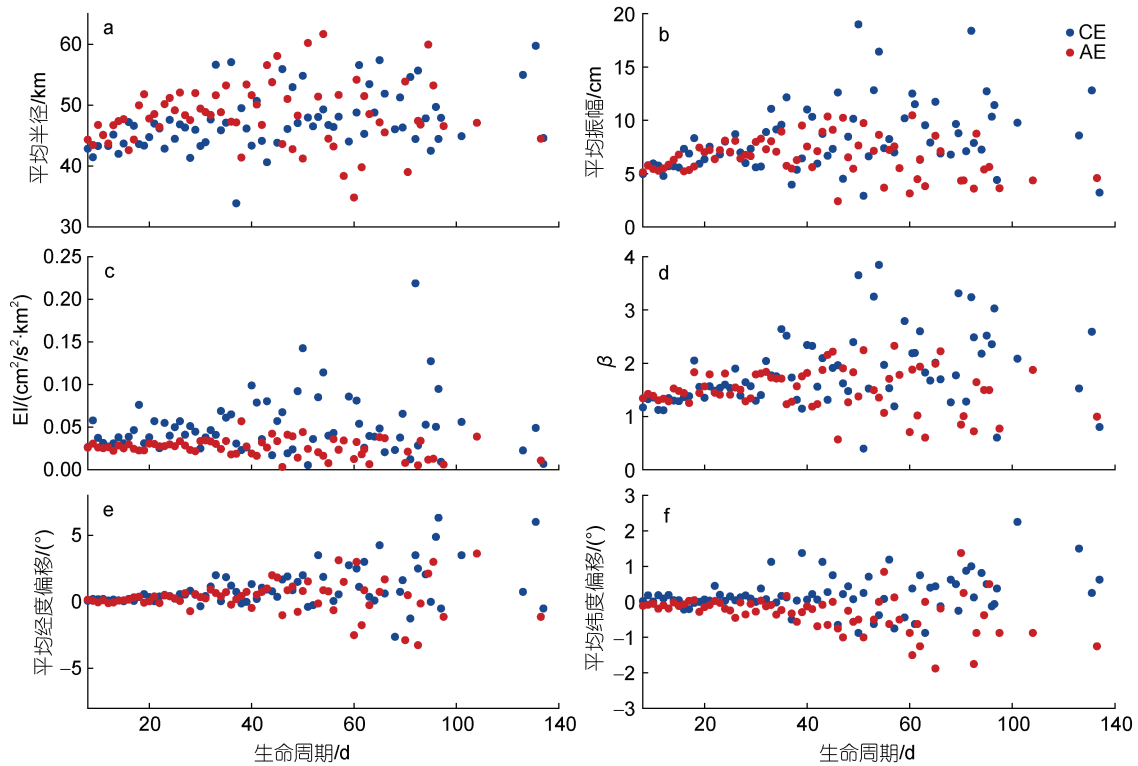


图 8 不同生命周期跨锋面涡旋对应的平均半径(a)、平均振幅(b)、EI (c)、 β (d)、平均经度偏移(e)和平均纬度偏移分布(f)
Fig. 8 Average radius (a), average amplitude (b), EI (c), β (d), average longitude offset (e), and average latitude offset (f) corresponded to different life spans of cross frontal eddies

注: 大于 60 d 涡旋数量少, 因此, 对大于 60 d 的涡旋的横坐标进行了缩短处理

和 AE 的 β 都大于 1。此外, 涡旋的经纬度方向偏移中显示, 经度方向(东西方向)上的偏移主要发生在 20 d 周期以上的涡旋, 往东偏移更明显(图 8e); 纬度方向(南北方向)上 AE 偏向高纬, CE 偏向低纬(图 8f)。综上, 大部分跨锋面涡旋都具有携带水团移动的能力($\beta > 1$), 且偏向低纬向移动的 CE 能量强度明显更大, 契合 Frenger 等(2015)⁷⁴²⁷ 的观点。因此, 结合图 6 和图 7 可推测, 通过不同极性涡旋的跨锋面经向输送, AE 向高纬, CE 向低纬, 能够起到缓解锋面两侧海水温度、盐度等特性差异, 同时经向上运输不同源水团的作用。

2.3 涡旋对海洋内部水文结构的影响

涡旋内部的独特水文结构特征能够显示涡旋对物质的垂向、水平迁移作用。为了初步评估涡旋的这一作用, 本文筛选了研究区域内 4 组同一时期相近 CE 和 AE 内部或者其影响范围内的 Argo 水文剖面, 以案例的形式进行对照分析(图 9 和图 10)。首先, 图 9 显示了两组 Argo 剖面, 分别位于同时期相邻 CE 和 AE 内部(图 9a1~9a5), 或者 CE 影响范围内及临近的 AE 内部(图 9b1~9b5)。结果反映, 这两组涡旋中, CE

和 AE 拥有完全不同的温盐特性, 且显著差异持续到 1 500 dbar 以深。CE 从次表层(200 dbar)开始位温保持在 5 °C 以下, 并不随深度显著改变; 盐度从海表的近 35.5 随着深度缓慢递增; 同时密度从次表层开始保持相对高密状态。这种低温且相对高密度的结构显示了南极高纬度水柱的特征。另一方面, AE 的温盐从海表(位温 > 12 °C, 盐度 > 35)向海洋内部递减, 在 500~1 000 dbar 之间出现显著跃层, 同时在 1 000 dbar 以深出现盐度极小值(< 34.5), 即南极中层水特征(Makarim *et al.*, 2019), 反映了来自低纬度的水柱特点。以上证据证明, 在南大洋这样经向温盐特性变化显著的海域, 不同极性的涡旋能够跨锋面实现两种完全不同源水团的远距离输送, 并可能对局地海洋环境造成重要影响。

图 10 显示了另外两组同时期相邻 CE 和 AE 内部或影响范围内 Argo 剖面结果。与上两组涡旋水文结构对比结果不同, 这两组 CE 和 AE 内部温盐特征高度重合(图 10a5 和 10b5), 仅在近海表出现差异。尽管如此, 在剖面图中, CE 的温盐特征相较于 AE 具有明显被抬升的特点, 对比前后者的海洋内部盐度极小

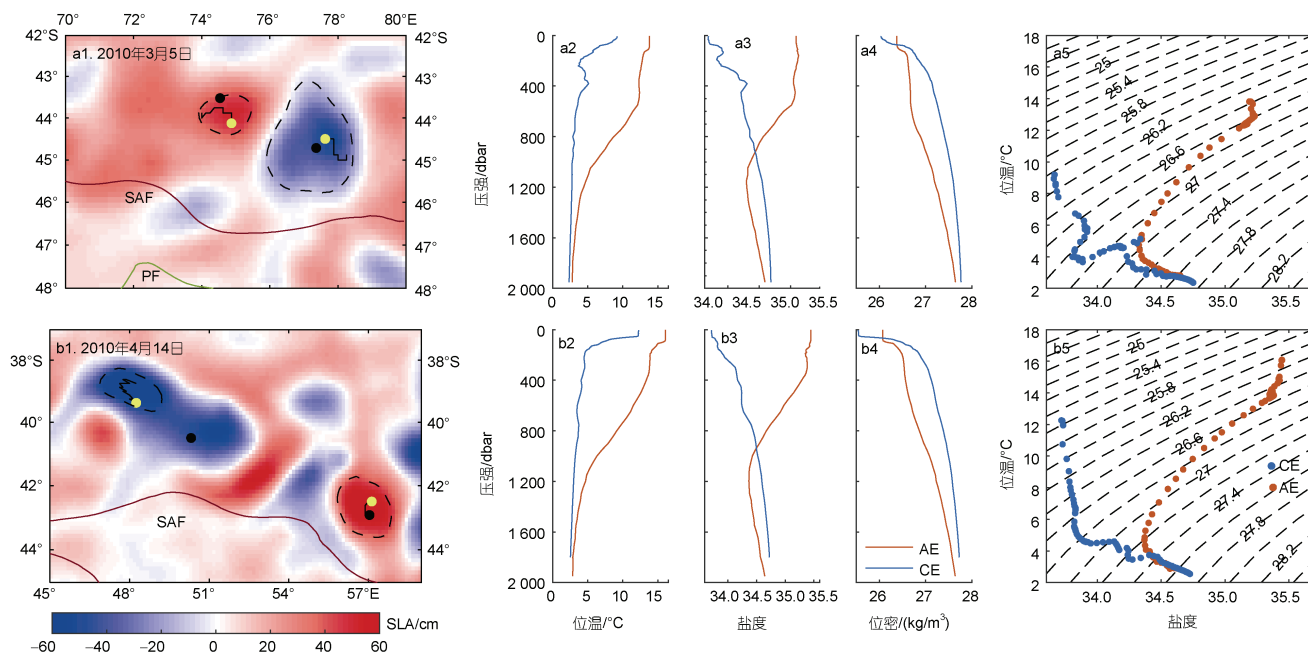


图 9 两组同一时期邻近 CE 与 AE 内部或影响区域内水文特征的比较

Fig.9 Comparison of hydrographic characteristics inside or in the affected area of two pairs of adjacent CE and AE in the same period
 注: 黑色圆点表示 Argo 浮标站点; 黑色实线表示涡旋生命周期内的移动轨迹; 黑色虚线表示涡旋外部轮廓; 黄色圆点表示涡旋第一天出现的位置; a1 和 b1 中深红色实线表示亚南极锋(subantarctic front, SAF), a1 中绿色表示极锋(polar front, PF); 等值线上的数字表示位密, 单位为 kg/m^3 (图 9a5, 9b5)

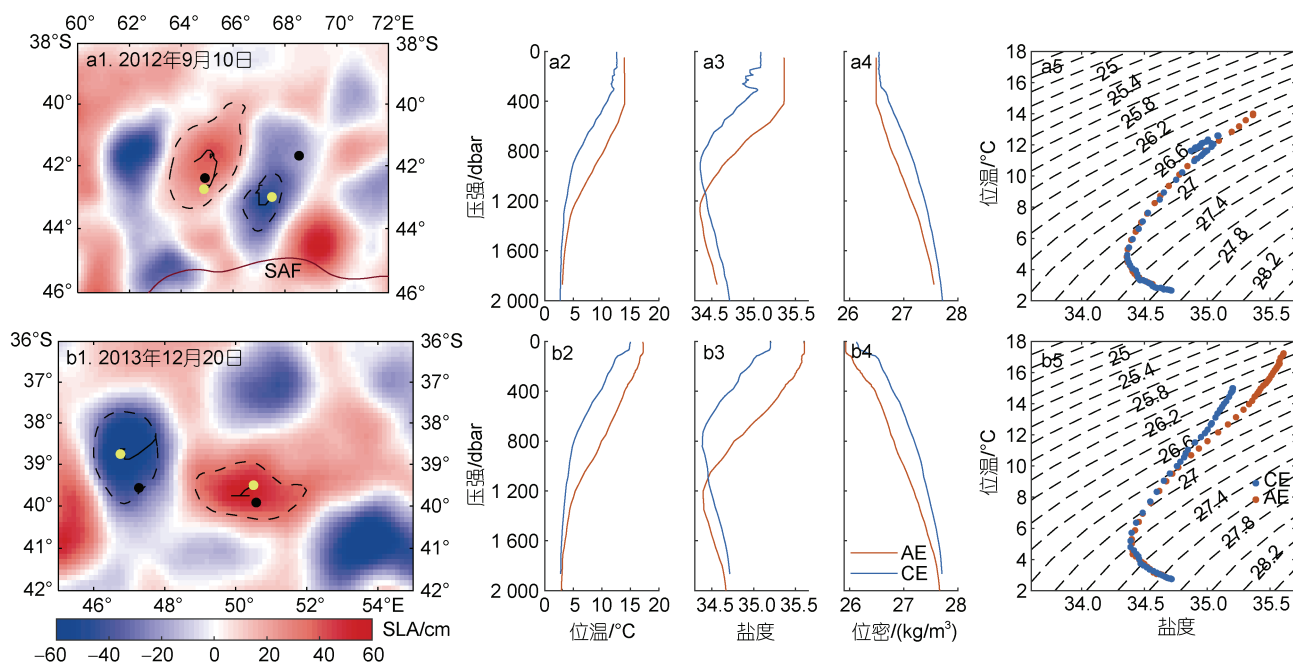


图 10 另外两组同一时期邻近 CE 与 AE 内部或影响区域内水文特征的比较

Fig.10 Comparison of hydrographic characteristics inside or in the affected area of the other two pairs of adjacent CE and AE in the same period
 注: 黑色圆点表示 Argo 浮标站点; 黑色实线表示涡旋生命周期内的移动轨迹; 黑色虚线表示涡旋外部轮廓; 黄色圆点表示涡旋第一天出现的位置; 深红色实线表示 SAF 锋面的相对位置; 等值线上的数字表示位密, 单位为 kg/m^3 (图 10a5, 10b5)

值所在深度可知, a 组(图 10a3)涡旋的 CE 相较于 AE 抬升了 320 dbar, b 组(图 10b3)涡旋的 CE 相较于 AE 抬升了 464 dbar。这两组对比结果反映了涡旋的另外一个重要作用, 即不同极性涡旋对同一来源水团, CE 具有抬升作用, 而 AE 具有压沉作用。当这种 CE 和 AE 靠近时, 必然会增强相邻水柱的斜压性, 进而可能引发斜压不稳定促进跨密度面混合。

3 结论

本文利用 2005~2019 年卫星高度计数据, 基于流场几何的探测方法, 对南大洋印度洋扇区中部的涡旋半径、振幅、传播距离进行统计, 并对涡旋产生地分布、跨锋面涡旋的移动特征和分布状况进行分析。在此基础上结合 Argo 浮标剖面数据, 对本区域涡旋内部水文情况进行进一步剖析。主要结论如下:

(1) 南大洋印度洋扇区中部涡旋生命周期多在 20 d 以内(64.25%)。在 15 a 期间, 生命周期在 30 d 之内的短寿命涡旋显著增加, 对总体涡旋数量变化特征起主要贡献作用。EKE 高值集中在厄加勒斯回流区域和凯尔盖朗高台下游, 从西往东逐渐向高纬偏转。在 2010 年代后期涡旋数量增加, 而年平均 EKE 异常却呈现减少趋势。

(2) 不同生命周期的涡旋产生地有显著差异。30 d 之内的短寿命涡旋主要产生在 SAF 和 SBdy 之间的锋面区域(55.03%)。随着生命周期的增长, 产生自 SAF 以北海域的涡旋占比增多, 其中包括了生命周期大于 80 d 的长寿命涡旋中的 85.35%。

(3) 该海域涡旋的平均半径多分布在 30~100 km 之间(91.63%), 包括了所有能够远距离传播的长寿命涡旋。平均半径越大的涡旋具有更大的平均振幅, 两者具有显著线性正相关关系。在所有涡旋中, 非线性的涡旋($\beta > 1$)有效占比为 58.57%。

(4) 大部分跨锋面涡旋都具有携带水团移动的能力($\beta > 1$), 跨锋面 AE(暖涡)向高纬移动, CE(冷涡)向低纬移动。其中, 偏向低纬移动的 CE 具有更大的能量强度。结果表明, 不同极性涡旋能够起到缓解锋面两侧海水温度、盐度等特性差异, 同时经向上运输不同源水团的作用。

(5) 海洋内部水文结构的案例分析证实, 不同极性的涡旋能够实现两种完全不同来源水团的远距离输送。另外, 不同极性涡旋对同一来源水团, CE 具有抬升作用, 而 AE 具有压沉作用。

本文采用了流体几何法对涡旋进行探测, 该方

法对涡旋流体分布具有较高要求。相对而言, 南大洋的涡旋具有生命周期短、半径较小的特征(Cotroneo *et al.*, 2013; Duan *et al.*, 2016), 同时该海域强劲的 ACC 流场和锋面分布易造成涡旋不稳定(容易合并或者分离), 因此, 可能增加该方法涡旋探测结果的不确定性。另外, 由于南大洋 Argo 剖面数量依然相对有限, 目前研究无法定量且全面地解析涡旋在跨锋面物质能量输送上的具体作用。

参 考 文 献

- 史久新, 乐肯堂, 崔秉昊, 2002. 南大洋凯尔盖朗海台区的流场结构及季节变化[J]. 海洋学报, 24(4): 11-22.
- 李立, 苏纪兰, 许建平, 1997. 南海的黑潮分离流环[J]. 热带海洋, 16(2): 42-57.
- 林霞, 王召民, 2016. 最近 21 年厄加勒斯反曲的变化[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 46(7): 11-14.
- 郑全安, 袁业立, 1988. 切变波动力学研究. 尺度分析与频散关系[J]. 海洋学报, 10(6): 659-665.
- 胡冬, 陈希, 毛科峰, 等, 2017. 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, 39(9): 1-14.
- 郭炳火, 万邦君, 汤毓祥, 1995. 东海海洋锋的波动及演变特征[J]. 黄渤海海洋, 13(2): 1-10.
- 郭炳火, 葛人峰, 1997. 东海黑潮锋面涡旋在陆架水与黑潮水交换中的作用[J]. 海洋学报, 19(6): 1-11.
- 董昌明, 2015. 海洋涡旋探测与分析[M]. 北京: 科学出版社: 7-10.
- 董昌明, 蒋星亮, 徐广珺, 等, 2017. 海洋涡旋自动探测几何方法、涡旋数据库及其应用[J]. 海洋科学进展, 35(4): 439-453.
- CHAIGNEAU A, GIZOLME A, GRADOS C, 2008. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns [J]. Progress in Oceanography, 79(2/3/4): 106-119.
- CHELTON D B, SCHLAX M G, SAMELSON R M, *et al.*, 2007. Global observations of large oceanic eddies [J]. Geophysical Research Letters, 34(15): L15606.
- CHEN G X, HOU Y J, CHU X Q, 2011. Mesoscale eddies in the South China Sea: Mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(C6): C06018.
- CIVIL-MAZENS M, CROSTA X, CORTESE G, *et al.*, 2021. Impact of the Agulhas Return Current on the oceanography of the Kerguelen Plateau region, Southern Ocean, over the last 40 kyrs [J]. Quaternary Science Reviews, 251: 106711.
- COTRONEO Y, BUDILLON G, FUSCO G, *et al.*, 2013. Cold core eddies and fronts of the Antarctic Circumpolar Current south of New Zealand from *in situ* and satellite data [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 118(5): 2653-2666.
- DELMAN A S, LEE T, QIU B, 2018. Interannual to multidecadal forcing of mesoscale eddy kinetic energy in the subtropical southern Indian Ocean [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 123(11): 8180-8202.
- DE RUIJTER W P M, RIDDERINKHOF H, SCHOUTEN M W,

2005. Variability of the southwest Indian Ocean [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 363(1826): 63-76.
- DONG C M, LIN X Y, LIU Y, *et al*, 2012. Three-dimensional oceanic eddy analysis in the Southern California Bight from a numerical product [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 117(C7): C00H14.
- DUAN Y L, LIU H W, YU W D, *et al*, 2016. Eddy properties in the Pacific sector of the Southern Ocean from satellite altimetry data [J]. Acta Oceanologica Sinica, 35(11): 28-34.
- FRENGER I, MÜNNICH M, GRUBER N, *et al*, 2015. Southern Ocean eddy phenomenology [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 120(11): 7413-7449.
- FU L L, 2009. Pattern and velocity of propagation of the global ocean eddy variability [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 114(C11): C11017.
- FU L L, CHELTON D B, LE TRAON P Y, *et al*, 2010. Eddy dynamics from satellite altimetry [J]. Oceanography, 23(4): 14-25.
- GILLE S T, 1994. Mean sea surface height of the Antarctic Circumpolar Current from Geosat data: Method and application [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 99(C9): 18255-18273.
- GILLE S T, 1997. The Southern Ocean momentum balance: Evidence for topographic effects from numerical model output and altimeter data [J]. Journal of Physical Oceanography, 27(10): 2219-2232.
- GILLE S T, CARRANZA M M, CAMBRA R, *et al*, 2014. Wind-induced upwelling in the Kerguelen Plateau region [J]. Biogeosciences, 11(22): 6389-6400.
- HUGHES C W, 1995. Rossby waves in the Southern Ocean: A comparison of TOPEX/POSEIDON altimetry with model predictions [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 100(C8): 15933-15950.
- HUGHES C W, ASH E R, 2001. Eddy forcing of the mean flow in the Southern Ocean [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 106(C2): 2713-2722.
- ITO T, WOLOSZYN M, MAZLOFF M, 2010. Anthropogenic carbon dioxide transport in the Southern Ocean driven by Ekman flow [J]. Nature, 463(7277): 80-83.
- JAYNE S R, MAROTZKE J, 2002. The oceanic eddy heat transport [J]. Journal of Physical Oceanography, 32(12): 3328-3345.
- JIA F, WU L X, LAN J, *et al*, 2011. Interannual modulation of eddy kinetic energy in the southeast Indian Ocean by Southern Annular Mode [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(C2): C02029.
- KOSTIANOY A G, GINZBURG A I, FRANKIGNOULLE M, *et al*, 2004. Fronts in the Southern Indian Ocean as inferred from satellite sea surface temperature data [J]. Journal of Marine Systems, 45(1/2): 55-73.
- LAMONT T, VAN DEN BERG M A, 2020. Mesoscale eddies influencing the sub-Antarctic Prince Edward Islands Archipelago: Origin, pathways, and characteristics [J]. Continental Shelf Research, 210: 104257.
- LU J H, SPEER K, 2010. Topography, jets, and eddy mixing in the Southern Ocean [J]. Journal of Marine Research, 68(3/4): 479-502.
- MAKARIM S, SPRINTALL J, LIU Z Y, *et al*, 2019. Previously unidentified Indonesian Throughflow pathways and freshening in the Indian Ocean during recent decades [J]. Scientific Reports, 9(1): 7364.
- MORROW R, CHURCH J, COLEMAN R, *et al*, 1992. Eddy momentum flux and its contribution to the Southern Ocean momentum balance [J]. Nature, 357(6378): 482-484.
- MORROW R, COLEMAN R, CHURCH J, *et al*, 1994. Surface eddy momentum flux and velocity variances in the Southern Ocean from Geosat altimetry [J]. Journal of Physical Oceanography, 24(10): 2050-2071.
- NENCIOLI F, DONG C M, DICKEY T, *et al*, 2010. 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, 27(3): 564-579.
- PARK Y H, DURAND I, KESTENARE E, *et al*, 2014. Polar Front around the Kerguelen Islands: An up-to-date determination and associated circulation of surface/subsurface waters [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(10): 6575-6592.
- PARK Y H, GAMBERONI L, CHARRIAUD E, 1993. Frontal structure, water masses, and circulation in the Crozet Basin [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 98(C7): 12361-12385.
- PARK Y H, VIVIER F, ROQUET F, *et al*, 2009. Direct observations of the ACC transport across the Kerguelen Plateau [J]. Geophysical Research Letters, 36(18): L18603.
- ROSSO I, HOGG A M, STRUTTON P G, *et al*, 2014. Vertical transport in the ocean due to sub-mesoscale structures: Impacts in the Kerguelen region [J]. Ocean Modelling, 80: 10-23.
- SABU P, GEORGE J V, ANILKUMAR N, *et al*, 2015. Observations of watermass modification by mesoscale eddies in the subtropical frontal region of the Indian Ocean sector of Southern Ocean [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 118: 152-161.
- SALLÉE J B, MORROW R, SPEER K, 2008. Eddy heat diffusion and subantarctic mode water formation [J]. Geophysical Research Letters, 35(5): L05607.
- SALLÉE J B, SPEER K, RINTOUL S R, 2011. Mean-flow and topographic control on surface eddy-mixing in the Southern Ocean [J]. Journal of Marine Research, 69(4/5/6): 753-777.
- SOKOLOV S, RINTOUL S R, 2002. Structure of southern ocean fronts at 140°E [J]. Journal of Marine Systems, 37(1/2/3): 151-184.
- SWART N C, ANSORGE I J, LUTJEHARMS J R E, 2008. Detailed characterization of a cold Antarctic eddy [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 113(C1): C01009.
- TALLEY L D, PICKARD G L, EMERY W J, *et al*, 2011. Southern ocean [M] // Descriptive Physical Oceanography

- [M]. 6th ed. Boston, MA: Academic Press: 437-471.
- THOMPSON A F, SALLÉE J B, 2012. Jets and topography: Jet transitions and the impact on transport in the Antarctic Circumpolar Current [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 42(6): 956-972.
- WANG J B, MAZLOFF M R, GILLE S T, 2016. The effect of the Kerguelen Plateau on the ocean circulation [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 46(11): 3385-3396.
- WATERMAN S, GARABATO A C N, POLZIN K L, 2013. Internal waves and turbulence in the Antarctic Circumpolar Current [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 43(2): 259-282.
- WEBB D J, 1993. A simple model of the effect of the Kerguelen Plateau on the strength of the Antarctic Circumpolar Current [J]. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 70 (1/2/3/4): 57-84.

CHARACTERISTICS OF EDDIES IN THE CENTRAL INDIAN SECTOR OF THE SOUTHERN OCEAN BASED ON SATELLITE OBSERVATION FROM 2005 TO 2019

LI Deng¹, CHENG Ling-Qiao^{1,2,3}, YAN Chen-Bing¹, ZHANG Chun-Ling^{1,2,3}, HU Song^{1,2,3}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Demonstration Center for Experimental Teaching of Marine Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 3. Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Restoration Technologies, MNR, Shanghai 201306, China)

Abstract In the central Indian Ocean sector of the Southern Ocean beside the topographic control (Kerguelen plateau), the confluence of Antarctic Circumpolar Current (ACC) and Agulhas Return Current strengthens the downstream baroclinic shear, resulting in a significant increase in eddy energy. Therefore, the study on eddies in this region is helpful to understand the eddies characteristics and the distribution relationship between topography and eddies in this region. Based on the satellite data from 2005 to 2019, a statistic study on the characteristics of the eddies was conducted and their generation distribution and the movement of the cross frontal eddies were analyzed. In addition, combined with the Argo profile data, hydrographic properties inside eddies were further evaluated. Results show that most of the eddy life cycles are within 20 days (64.25%), and most average radius during lifespan is between 30~100 km (96.13%). The average radius has a positive correlation with the average amplitude (correlation coefficient $R = 0.55$). Eddies with larger life cycle have longer average propagation distance. The number of eddies increased significantly since 2014 due mainly to the increase in the number of short-lived eddies (<30 days). In contrast, the eddy kinetic energy (EKE) anomaly decreased in the late 2010s. The generation location of eddies gradually moved from the frontal area between the Subantarctic Front (SAF) and Southern Boundary of the ACC to the north of SAF with the increase of life cycles. Among the cross frontal eddies, the warm eddies tended to move to higher latitudes while the cold eddies moved to lower latitudes, most of which can carry water masses. According to the analysis results of hydrographic characteristics inside eddies, eddies with different polarities could accomplish long-distance transportation of completely different water masses. For water masses from the same source, cyclonic eddies have a vertical uplift effect, while the anticyclonic ones have a subsidence effect. This research helps to improve the understanding of eddy characteristics and variability in the Southern Ocean and supports the further research on eddy dynamics.

Key words Kerguelen; ocean eddy; statistical characteristics; cross frontal eddy; vertical structure