

严晨冰, 程灵巧, 朱国平. 南极斯科舍海涡旋分布及其内部水文结构特征分析[J]. 海洋学报, 2022, 44(3): 1–14, doi:10.12284/hyxb2022023
Yan Chenbing, Cheng Lingqiao, Zhu Guoping. Distribution and the internal hydrographic characteristics of eddies in the Scotia Sea, Antarctica[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(3): 1–14, doi:10.12284/hyxb2022023

南极斯科舍海涡旋分布及其内部水文结构特征分析

严晨冰¹, 程灵巧^{1,2,3*}, 朱国平^{1,2,4,5}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 极地研究中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 海洋科学与
与技术实验教学示范中心, 上海 201306; 4. 上海海洋大学 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室 极地海洋生态系
统研究室, 上海 201306; 5. 上海海洋大学 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 210306)

摘要: 南大洋涡旋在跨锋面物质热量输送方面具有重要作用, 斯科舍海位于德雷克海峡东面, 属于重要的经济渔区, 因此针对斯科舍海的涡旋分布及其影响进行研究具有迫切意义。本文基于 2005–2019 年卫星遥感数据对斯科舍海涡旋进行了探测与追踪, 并统计了涡旋半径、传播距离、生命周期等特征参数, 分析涡旋的地理分布特点、涡旋跨锋面情况以及移动特性, 同时结合剖面数据分析了该海域涡旋内部水文特性。结果显示, 该海域近 92% 的涡旋均为生命周期小于 30 d 的短寿命涡旋, 平均半径集中在 10~30 km 之间。涡旋产生地主要集中在斯科舍海中部的极锋 (PF)、南极绕极流南锋 (SACCF) 和亚南极锋 (SAF) 附近水深为 3 000~5 000 m 的海域。受斯科舍海海底山脊的阻碍作用, 涡动能 (EKE) 高值聚集在 PF 和 SAF 之间, 并在 2016 年之后达到显著正异常。跨 PF 和 SACCF 锋面的涡旋中, 低纬向涡旋数量占主导, 其中以气旋式涡旋居多。在高纬向涡旋中反气旋式涡旋占主导。涡旋内部水文结构显示, 冷涡内部次表层相对低温低盐, 与高纬水团特征一致; 暖涡内部次表层相对高温高盐。推测冷涡可能携带高纬海域水体向低纬移动, 暖涡可能携带低纬海水向高纬移动。本研究为进一步理解斯科舍海涡旋特性及其在该海域物质能量运输上的作用研究提供了基础支撑。

关键词: 斯科舍海; 海洋涡旋; 特征统计; 跨锋面输送; 垂直结构

中图分类号: P728; P731.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)03-0001-14

1 引言

南大洋南极绕极流 (Antarctic Circumpolar Current, ACC) 海域为海洋涡旋的高发海区。ACC 内强劲的锋面系统、斜压不稳定的增强及其北侧大陆边界层的不稳定性等因素会诱发频繁的涡旋活动^[1]。一方面, 涡旋可克服 ACC 纬向流动所产生的障碍, 跨越极锋 (Polar Front, PF) 向高纬海域输送热量和盐量^[2], 同时也可将海表面风应力产生的动量输送至海底, 以平衡西风产生的强烈动量输入^[3]。另一方面, 南大洋

涡旋对物质能量的再分配, 对生物分布有重要影响作用^[4]。

近年来, 随着卫星观测资料的日益增多以及模型分辨率提高和涡旋自动探测方法逐渐成熟, 针对南大洋涡旋的研究也已有较广泛的开展。Frenger 等^[1]使用 Okubo-Weiss (OW)^[5-6] 参数法对南大洋中尺度涡旋统计特征进行了研究, 指出 ACC 及边界流系统区域是大多数涡旋的产生和消亡地, 而水深小于 2 000 m 的区域几乎无中尺度涡旋产生。Swart 等^[7]发现西南印度洋的一个冷涡直径可达 175 km, 这要比在新西兰

收稿日期: 2021-03-18; 修订日期: 2021-06-02。

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1406801); 国家自然科学基金 (41506219, 41776185)。

作者简介: 严晨冰 (1997—), 女, 安徽省合肥市人, 主要从事极地海洋学和生物学研究。E-mail: cbyan1997@163.com

* 通信作者: 程灵巧 (1985—), 女, 浙江省台州市人, 讲师, 主要从事海洋微结构混合、南极底层水的生成与变异和中尺度过程研究。E-mail: lqcheng@shou.edu.cn

南部的直径 165 km^[8] 和德雷克海峡的直径小于 80 km^[9] 的冷涡均要大。在涡旋对经向热盐运输的贡献方面, Jayne 和 Marotzke^[10] 发现涡旋热运输中的辐散分量在 ACC 中最强; Trani 等^[11] 的研究表明 ACC 区经向热传递数值范围处于 -0.4~ -1.1 PW (1 PW=10¹⁵ W) 之间; Patel 等^[12] 的研究表明塔斯马尼亚南部气旋式涡旋向亚南极区的淡水通量与埃克曼通量有着相同的量级。另外, 涡旋对生物影响方面, 涡旋可以引起南乔治亚岛周围浮游植物的暴发^[13], ACC 流域产生的锋面涡旋为鱼类仔体跨锋面运输提供了可能性^[14]。

斯科舍海位于德雷克海峡东面、南极半岛北面的 61°~53°S, 75°~25°W 之间^[15], 其三面邻岛, 由海底山脊围成特殊的地质环境, 是南大洋的重要组成部分之一(图 1a)。自西穿过德雷克海峡的 ACC 向东北方向流经斯科舍海, 其流域内的 3 支主要锋面, 自北向南依次为亚南极锋 (Sub-antarctic Front, SAF)、PF 和南极绕极流南锋 (Southern ACC Front, SACCF), 锋面的不稳定性与特殊的地形相互作用导致了该海域涡旋频发的特点^[16]。目前对斯科舍海涡旋的已有研究包括涡旋活动对浮游植物的时空变化影响^[17] 以及西部德雷克海峡的涡旋热通量^[18]。此外, 斯科舍海东部的南乔治亚岛、南部的南奥克尼群岛和南设得兰群岛附近海域均有着丰富的浮游动物和鱼类资源^[19-20], 而 SACCF 区涡旋的活动是引起南乔治亚岛附近海域浮游植物年际变化的重要原因^[21]。因此, 掌握斯科舍海涡旋的参数、分布等特征对于进一步了解该海域的能量变化和生物-物理相互作用具有重要意义。此外, 目前国内对海洋涡旋的研究主要集中在北太平洋^[22-27] 和南海区域^[28-30], 尚无针对南极斯科舍海域的涡旋研究, 这为深入理解该海区物质能量输送以及生物资源分布带来了不确定性。与此同时, 近些年来国际社会对斯科舍海南侧, 尤其是南极半岛投入了更多的关注, 该海区为目前南极增温最为显著的区域^[31]。

由此, 本文基于 2005-2019 年间共 15 年的法国国家空间研究中心卫星海洋学存档数据中心 (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data, AVISO) 卫星高度计融合数据, 对斯科舍海进行涡旋的识别与追踪, 并统计涡旋半径、传播距离、生命周期等特征参数, 分析涡旋的地理分布特点、涡旋跨锋面情况以及移动特性, 全面解析斯科舍海涡旋的统计特征和结构。同时, 结合 Argo 和气候变化预测和碳水文数据局 (The Clivar and Carbon Hydrographic Data Office, CCHDO) 的水文数据, 分析了该海域涡旋对海洋内部水文特性再分配的影响。

2 数据与方法

2.1 数据

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 Topex/Poseidon、ERS-1 和 ERS-2、Jason-1 和 Jason-2、EnviSat 和 GFO (Geo Follow-On) 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) 和海表面地转流速异常, 时间分辨率为 1 d, 空间分辨率均为 0.25°×0.25°。SLA 为基于 1993-2012 年期间平均海平面的结果, 地转流速异常 (u' , v') 是基于地转关系由 SLA 计算得到, 计算公式为

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

式中, h' 为 SLA (单位: m); g 为重力加速度 (单位: m/s²); f 为科氏参数 (单位: s⁻¹)。本文选取了斯科舍海 (53°~61°S, 25°~75°W) 自 2005 年 1 月 1 日到 2019 年 12 月 31 日共 15 年间的的海数据。在进一步分析之前, 本研究将数据线性插值成 0.125°×0.125°的网格数据。

另外, 本文还利用 Argo (<http://www.argo.ucsd.edu>) 剖面数据对比同一时期邻近冷暖涡旋内部水文结构特征。同时, 两个跨涡旋内部温盐断面来自 CCHDO (<https://cchdo.ucsd.edu/search?bbox=-180,-90,180,-40>) 的 74JC20151217 (2015 年 12 月 25 日至 2016 年 1 月 11 日) 和 74JC20130319 (2013 年 3 月 18 日至 4 月 26 日) 的温深剖面仪 (Conductivity Temperature Depth Profiler, CTD) 断面数据结果。

2.2 涡旋的探测与参数计算

本文使用基于流场几何特征的涡旋自动探测方法^[32-33] 进行涡旋探测, 该方法已在多海域实现运用^[25, 34-35]。在这个方法中, 满足以下所有约束条件的点被定义为涡旋中心: (1) 沿涡旋中心点东西方向的速度分量 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; (2) 沿涡旋中心点南北方向的速度分量 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; (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, 即两个相邻的速度矢量方向必须位于同一个象限或相邻的两个象限。

确认涡旋中心后, 将中心点最外层封闭的流线判定为涡旋的边界, 涡旋的追踪则是在 $t+1$ 时刻寻找与 t 时刻最相近、极性 (涡旋的旋转方向) 相同的涡旋。确认涡旋的边界后, 将涡旋的半径定义为中心点到其边界的平均距离。

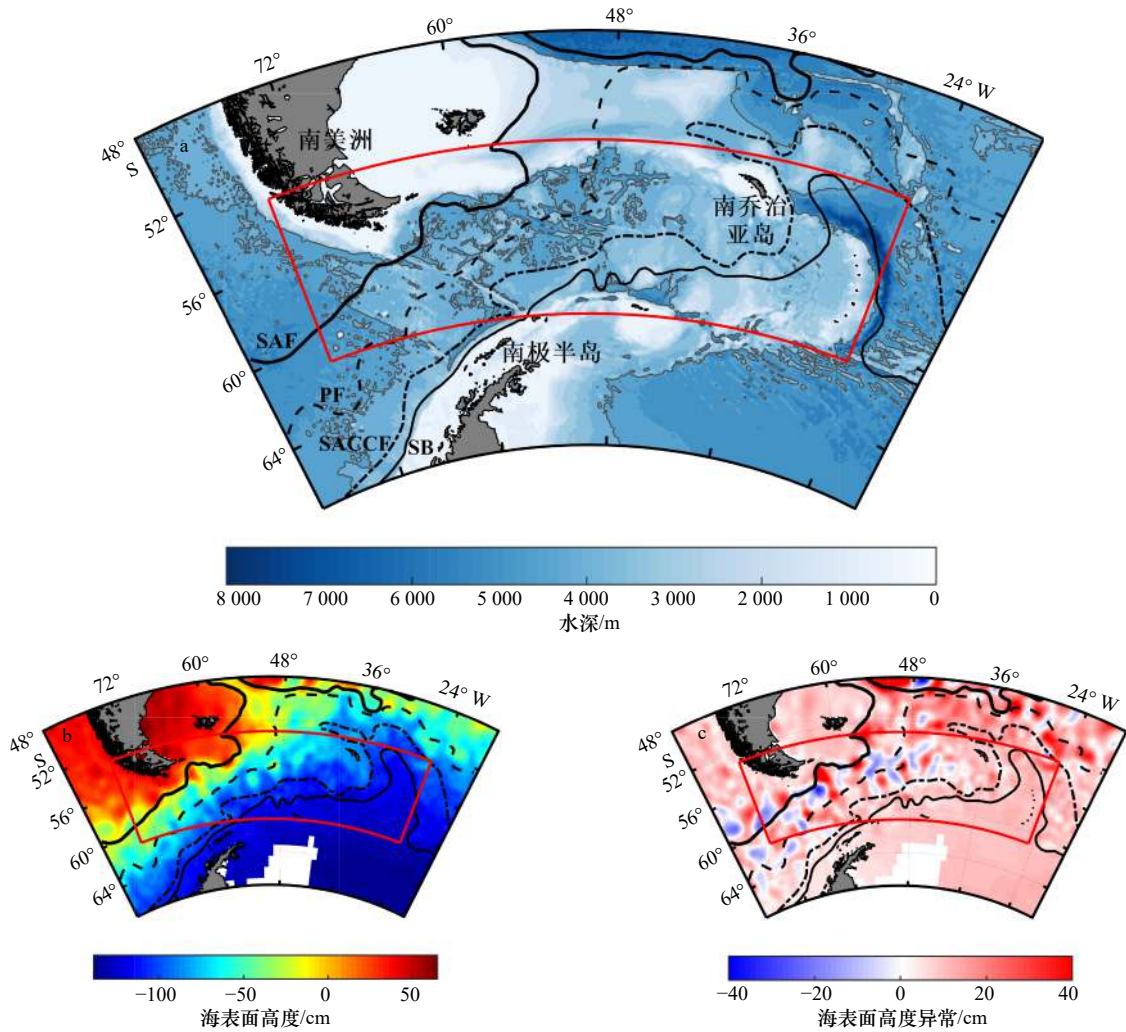


图1 研究区域地形(a), 海表面高度(b)和海表面高度异常(c)

Fig. 1 Topography of the study area (a), sea surface height (b) and sea surface anomaly (c)

图中红色框中为斯科舍海范围; a中锋面数据来自于Orsi等^[36], 自北向南依次是SAF(亚南极锋)、PF(极锋)、SACCF(南极绕极流)和SB(南极绕极流南部边界), 灰色等值线为4000m等深线; b和c分别为AVISO提供的2018年1月1日海表面高度和海表面高度异常分布
The range of Scotia Sea is shown in the red box; data of front is obtained from Orsi et al.^[36] in a, fronts from north to south are SAF (Sub-antarctic Front), PF (Polar Front), SACCF (Southern Antarctic Circumpolar Current Front) and SB (Southern boundary) of Antarctic Circumpolar Current, the gray contour is 4000 m isobath; b and c show sea surface height and sea surface anomaly on January 1, 2018 respectively, which are provided by AVISO

利用海表面地转流速异常数据, 本文计算了涡动能(Eddy Kinetic Energy, EKE), 公式为

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

式中, u' (单位: cm/s) 和 v' (单位: cm/s) 分别为纬向和经向的地转流速异常。

3 结果

3.1 涡旋数量特征

基于涡旋自动探测和追踪方法, 斯科舍海域15年间共追踪到51196个涡旋轨迹, 其中包含了12906个生命周期仅1d的涡旋, 在表1中没有对生命周期为1d的这些涡旋进行统计。由于涡旋即使在同一生

命周期范围内, 移动距离也有较大差异, 因此表1中也没有对平均传播距离进行标准差的计算。气旋式涡旋(Cyclonic Eddy, CE)和反气旋式涡旋(Anticyclonic Eddy, AE)分别为26345和24851个, 多为短寿命涡旋, 约92%的涡旋生命周期不足30d。另外, 生命周期越短的涡旋对应的平均传播距离也越短; 反之, 虽然生命周期长的涡旋个数较少, 但对应着较大的平均半径和传播距离。

图2为所有涡旋的生命周期、传播距离及生命周期内平均半径和最大半径所对应的数量分布关系。由图2a和图2b中可以看出, 随着生命周期和传播距离的增大, CE与AE的数量以基本重叠的变化趋势急剧减少。生命周期不足50d的涡旋占总涡旋数量

表 1 2005–2019 年斯科舍海涡旋生命周期、个数和对应平均半径、平均传播距离情况

Table 1 Lifespan, number of eddies, and the corresponded mean radius and propagation distance in the Scotia Sea from 2005 to 2019

生命周期/d	气旋式涡旋个数	反气旋式涡旋个数	平均半径/km	平均传播距离/km
[2, 30)	17 624	16 579	24.93±9.6	31.43
[30, 80)	1 854	1 828	33.43±8.48	115.96
[80, 250)	185	220	36.62±7.74	241.39

注: 平均半径中的误差部分显示一个标准差。

的 97.1%, 传播距离小于 150 km 的涡旋占比为 96.5%。两种涡旋平均半径在 10~30 km 之间的数量最多, 并在约 20 km 达到个数峰值(图 2c)。除峰值处气旋涡旋略多于反气旋涡旋外, 两者在其他半径值上的数量基本相同。另外, 图 2d 显示所有涡旋在其生命周期中最大半径达到 16 km 的个数最多; 最大半径在 25 km

以上的涡旋数量急剧下降。总体来看, 相比北太平洋黑潮流域等边界流系统, 斯科舍海区的涡旋寿命、半径和传播距离等特征参数均较小^[22-23]。ACC 平均流速约为 15 cm/s^[36], 相较于流速一般在 51~102 cm/s 的黑潮来说要小得多。由此可知, 不同背景流场和环境条件下产生的涡旋会存在较大差异。

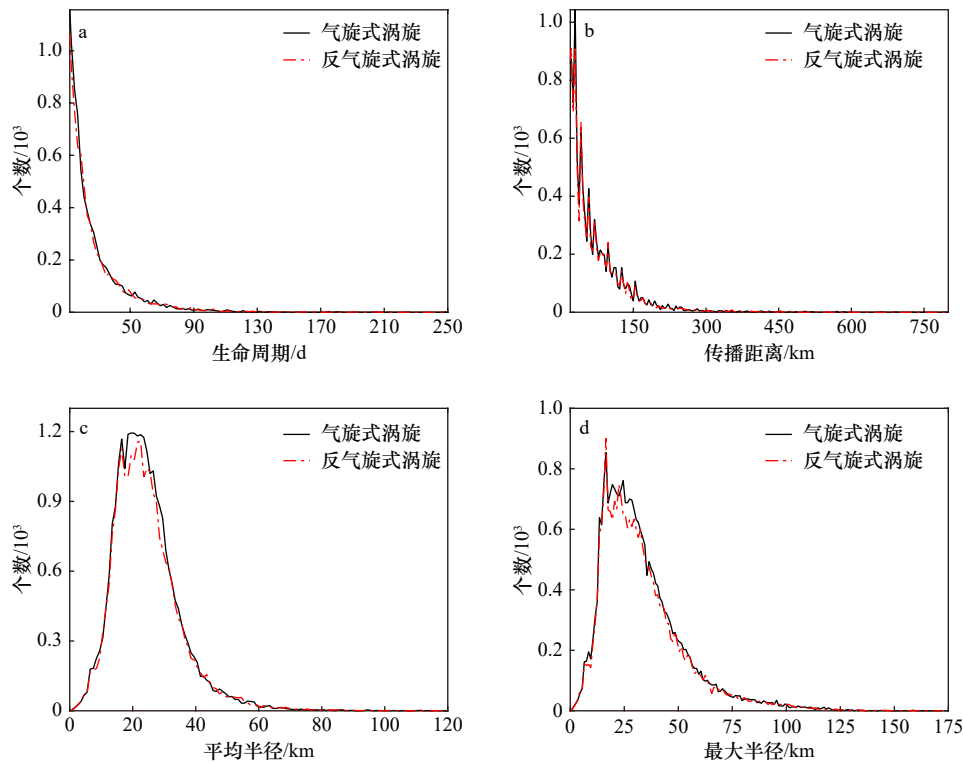


图 2 涡旋的生命周期(a)、传播距离(b)、生命周期内涡旋的平均半径(c)和最大半径(d)所对应的数量分布关系

Fig. 2 The number distributions corresponding to lifespan (a), propagation distance (b), mean radius (c) and maximum radius (d) during lifespan of all eddies

3.2 涡旋分布特征

为了研究涡旋产生的地理位置, 本文将研究区域分为经纬度 $1^\circ \times 0.5^\circ$ 的网格, 统计了 4 个生命周期范围内涡旋的总个数, 且计算出涡旋产生地落在网格内的比率(图 3)。在图 3 的 4 个生命周期范围中, 生命周期为 10~30 d 的涡旋数量最多, 其主要产生在 SAC-CF、SB 周围和 SAF 北部的南美洲陆坡附近(图 3a)。相比之下, PF 周围产生的这种短生命周期涡旋较

少。生命周期在 30~60 d 的涡旋大部分产生在 SAC-CF 和 SB 附近, 相较更短周期的涡旋产生地有向 PF 方向移动的趋势(图 3b), 而南美洲西南大陆周围已不再是该生命周期范围涡旋的产生热点区域。生命周期在 60~90 d 的涡旋, 产生地有部分位于 PF 流域内, 西南斯科舍海的德雷克海峡附近也成为这些涡旋的高发地(图 3c)。对于更长生命周期的涡旋, 其产生地几乎不再处于斯科舍海南端、北端和大陆坡

附近,而是主要集中在斯科舍海中部的PF、SACCF和SAF附近(图3d)。以上结果显示,相比较PF附近海域,大陆坡和SACCF附近的水深相对较浅,海底地

形变化大,产生了大部分短生命周期涡旋;由此进一步推断,涡旋的产生、分布及生命周期等特征参数可能与水深有着一定的联系。

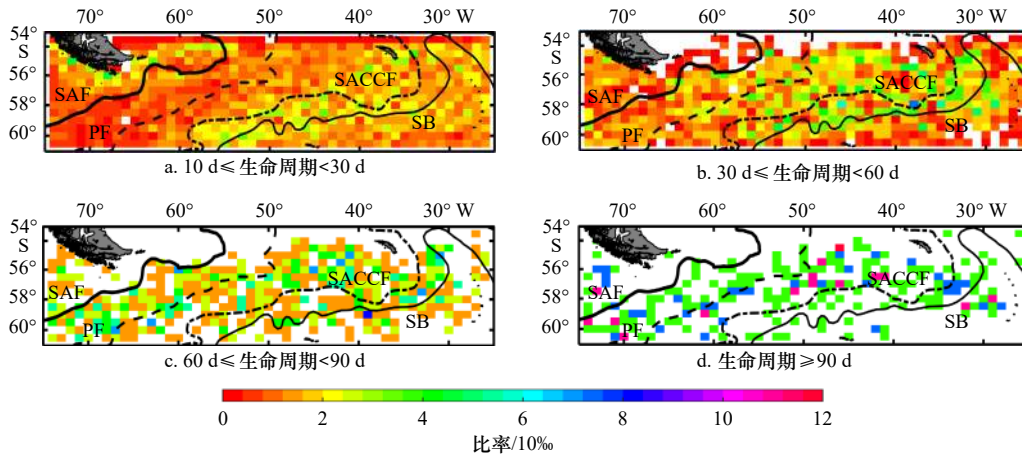


图3 不同生命周期范围内涡旋产生地落在 $1^\circ \times 0.5^\circ$ 网格内的比率分布

Fig. 3 Ratio distribution of eddies generated in the $1^\circ \times 0.5^\circ$ grids corresponding to different lifespan ranges

该比率通过产生地落在该网格内部的涡旋个数与所统计的寿命周期范围内涡旋的总个数之比获得。白色区域为没有相应生命周期涡旋产生的区域

The ratio is calculated as the ratio of the number of eddies originated in the grid and the total number of eddies for each statistical lifespan range. The white areas are those where no corresponding lifespan eddies are originated

为此,本文将探测到的所有涡旋产生地的水深、涡旋的生命周期、平均半径和传播距离绘制成散点图进行观察(图4)。由图可知,水深 $3\,000 \sim 5\,000 \text{ m}$ 所在海域内产生了大量涡旋,其中 $3\,000 \sim 4\,000 \text{ m}$ 和 $4\,000 \sim 5\,000 \text{ m}$ 这两个深度所在海域内产生的涡旋分别占总数的42.9%和15.1%。长寿命(生命周期大于 80 d)

和大尺度(平均半径大于 80 km)涡旋也多集中在 $3\,000 \sim 5\,000 \text{ m}$ 水深海域内,最大寿命的涡旋出现在水深接近 $4\,500 \text{ m}$ 的海域。由图4b可知,生命周期大于 80 d 、移动距离大于 300 km 的涡旋平均半径多集中在 $20 \sim 60 \text{ km}$ 范围内,其中最大移动距离达到 600 km 以上。相较之下,平均半径大于 80 km 的涡旋对应生命

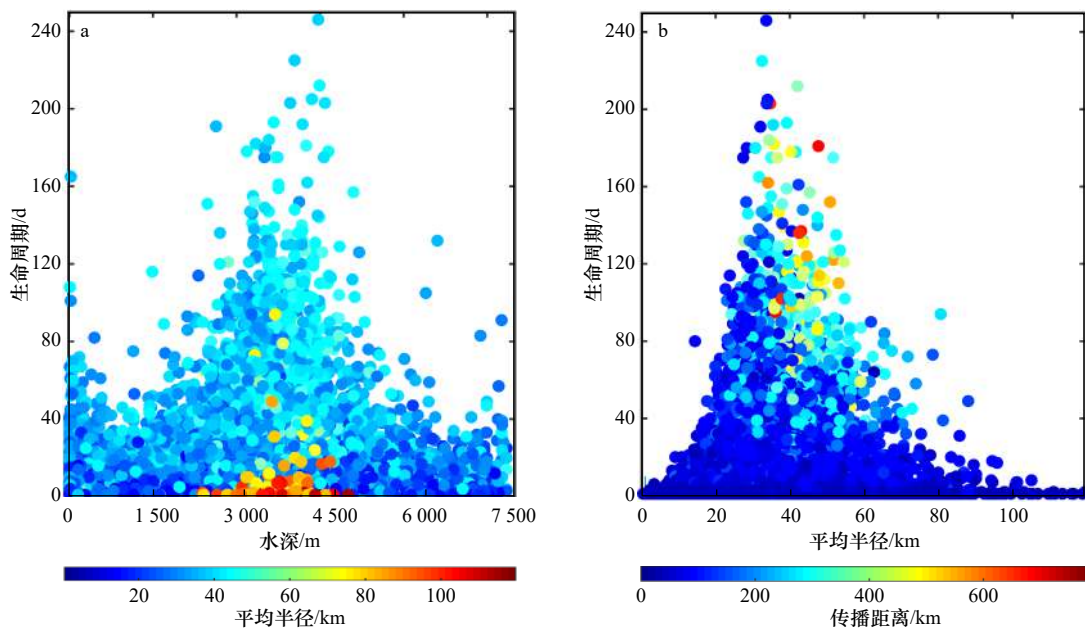


图4 涡旋产生地的水深、涡旋半径、生命周期和传播距离之间的关系

Fig. 4 Relationship among water depth of eddy generating area, eddy radius, lifespan and propagation distance

周期基本小于 40 d、移动距离小于 100 km。因此可知,在斯科舍海域,半径在 20~60 km 且生命周期大于 80 d 的涡旋可以移动更远距离。

3.3 涡动能分布及变化

EKE 的分布可以体现涡旋的活跃程度,即 EKE 越大的区域涡旋活动越强^[24]。2005–2019 年 15 年间的平均 EKE 分布如图 5a 所示。涡动能由德雷克海峡沿着 ACC 流向逐渐向斯科舍海中间海域增大,在 55°~58°S, 52°~63°W 之间,即 PF 和 SAF 中间达到 800 cm²/s² 以上,而至 45°W 以东海域, EKE 减少至 200 cm²/s² 以下。结合图 1 可知, EKE 高值聚集在斯

科舍海的海盆最深区域,东、南、北三面狭长的海底山脊(水深小于 2 000 m)处为低值区,这一特征契合 Frenger 等^[1]的观点,即涡旋较少在深度小于 2 000 m 的水域产生并传播。关于涡旋产生与海底地形的联系, Moore 等^[38]曾证实,南大洋涡旋出现和变化并不沿着 ACC 流向均匀发生,而与 ACC 穿过显著的海底地形(如大洋中脊)的区域密切相关,在南大洋西南印度脊处即是如此^[7]。因此,斯科舍海特殊的地形可能阻碍了涡旋的移动与能量的输运,致使 EKE 聚集在中部海盆处无法扩散。

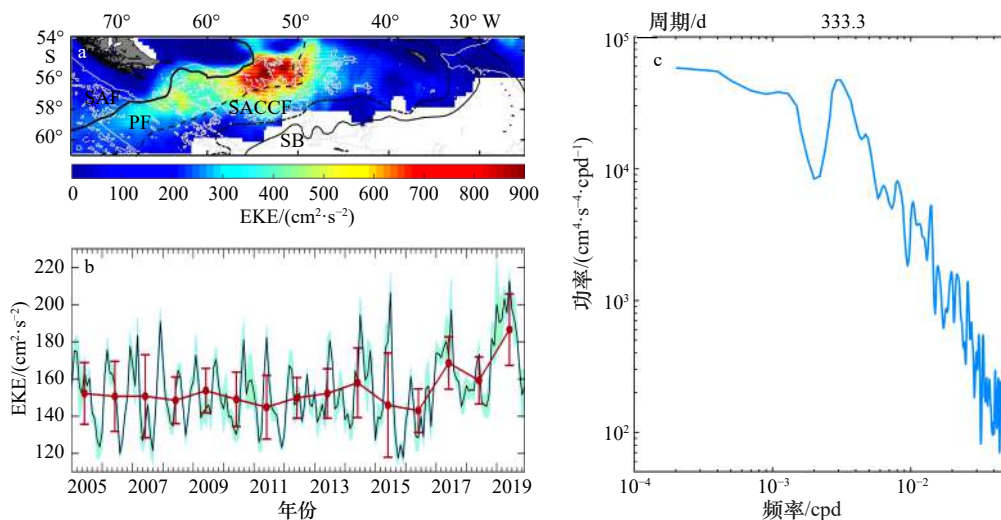


图 5 2005–2019 年平均涡动能(EKE)空间分布(a),白色等值线为 4 000 m 等深线;月平均 EKE(黑线)及标准差范围(浅蓝色),年平均 EKE 以及标准差(红线)(b);基于日平均 EKE 时间序列的功率谱分析(c)

Fig. 5 The spatial distribution of mean eddy kinetic energy (EKE) from 2005 to 2019, white contours are 4 000 m isobaths (a); monthly mean EKE (black line) and one standard deviation range (light blue), annual-mean EKE and standard deviation (red line) (b); power spectrum of daily EKE time-series (c)

其次,为了获得 EKE 的时间变化,绘制了 15 年间整个斯科舍海域 EKE 月平均和年平均时间序列(图 5b)。可以看出,月平均 EKE 的时间序列呈季节性上下震荡的模式。月平均 EKE 极小值多集中在 11 月和 12 月,且在 2006 年和 2015 年 11 月达到最小的 120 cm²/s² 以下。相反,月平均 EKE 的极大值多集中在 6–8 月之间,在 2019 年 6 月达到最大的 210 cm²/s² 以上。从年平均 EKE 时间序列来看,在 2005–2016 年间 EKE 呈较微弱的下降趋势,但均在 150 cm²/s² 附近震荡。2016 年之后, EKE 有较显著的增大趋势,2019 年则急剧增大到 180 cm²/s² 以上。通过对 EKE 时间序列进行谱分析发现, EKE 在约 333 d 的周期上有一个显著波峰,比一年短几十天,与月平均 EKE 上下震荡分布相符(图 5c)。

2016 年之后 EKE 的显著增强,驱使我们进一步

分析斯科舍海 SLA 绝对值异常和 EKE 异常情况,参考基准为 2005–2019 年的 15 年平均值(图 6)。SLA 绝对值在 2010 年之前具有显著的负异常,进入 2010 年之后变弱,并在 2013 年开始逆转为正异常,随后从 2016 年到 2017 年之间具有最大增幅,并开始呈现出显著正异常。EKE 异常在 2005–2016 年之间基本呈现为较弱的负异常。然而从 2017 年开始, EKE 转变为正异常,并在 2019 年达到显著状态。SLA 绝对值异常和 EKE 异常尽管在前期分布状态不同,但在 2016 年后都有明显增强,转为正异常。以往研究记录表明,1980 年以来南极海冰覆盖面积在持续缓慢增大之后,于 2016 年突然降低,并于 2016 年 11–12 月达到异常最低值,同时南半球环状模达到 1968 年以来同月份的最低值^[39–40]。由此可知,本文中 2016 年之后的 SLA 绝对值和 EKE 正异常与南极大气和海冰

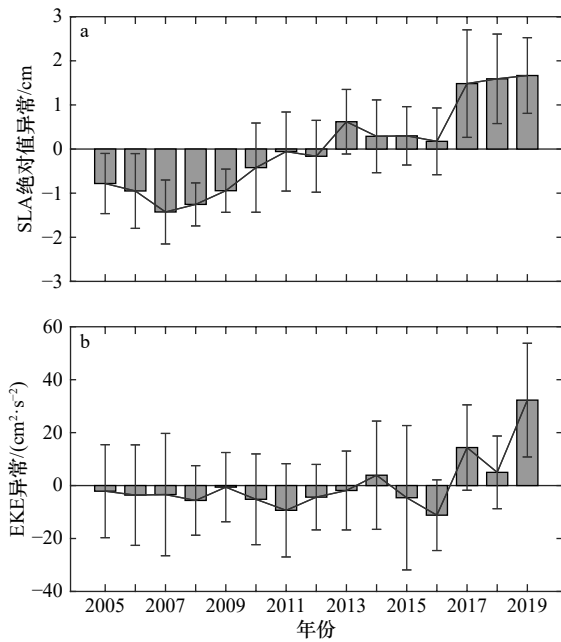


图6 海表面高度异常(SLA)绝对值异常(a)和涡动能(EKE)异常(b)

Fig. 6 Anomaly of absolute sea level anomaly (SLA) (a) and eddy kinetic energy (EKE) (b)

异常的参考基准为2005–2019年之间15年的平均值,误差条表示年平均异常结果对应的标准差

The anomaly respect to the 15-year mean values during 2005–2019, error bars denoted the standard deviations for annually mean results

覆盖状况突变在时间上具有对应性,前者体现的海洋涡动能显著增强,可能与大气动力环境改变和海冰覆盖减少导致的更多能量向海输送有关^[41]。

3.4 涡旋跨锋面特征

涡旋的分布与锋面存在着密切的联系,且已知南大洋的涡旋可以通过跨锋面运输产生经向上的热盐交换。因此,本文基于Orsi等^[37]的锋面数据,统计了15年间跨PF和SACCF两锋面的涡旋个数(表2)。总体来看,共检测到1422个跨PF和SACCF的涡旋,其中低纬向的CE在数量上占主导地位(35.2%),其次为低纬向的AE数量,占总数的30.7%。相较之下,跨两锋面的高纬向涡旋数量较少,其中跨PF的涡旋

表2 跨极锋(PF)和南极绕极流南锋(SACCF)两锋面涡旋个数统计

Table 2 The number of eddies crossing Polar Front (PF) and Southern Antarctic Circumpolar Current Front (SACCF)

锋面	高纬向移动		低纬向移动		总个数
	CE个数	AE个数	CE个数	AE个数	
PF	36	70	221	171	489
SACCF	177	210	280	266	933

数量比跨SACCF的同类涡旋少1个量级。在这些高纬向涡旋中,AE数量占主导地位。

为了进一步探究涡旋的具体移动方向,将涡旋的产生位置移到相同的坐标点($0^{\circ}, 0^{\circ}$)处,得到跨PF和SACCF涡旋的相对移动轨迹(图7)。纬向上,跨PF的CE和AE呈现出显著的东向移动模式,最远可移动约 11° 。经向上,大部分跨PF的CE倾向于向北移动,移动距离可达到 5° 。相较之下,AE向北移动距离均处于 3° 以内。跨SACCF涡旋的移动轨迹由产生点向外呈放射状分布(图7d,图7e),无显著的方向性,与表2中跨SACCF的各类涡旋数量上相当的特点一致。因此,跨PF和SACCF的涡旋呈现出完全不同的移动轨迹,前者总体向东北移动,且移动距离更远,而后者总体呈放射状分布,无显著特定方向性。

结合表1和图3可知,斯科舍海产生的涡旋约92%均为短寿命涡旋(<30 d),而SACCF附近为短寿命涡旋产生的热点区域。徐茗等^[42]在研究全球海域短寿命涡旋特征时发现,它们多以西向移动为主,但在较强东向环流的海域,涡旋会随之向东迁移。斯科舍海ACC呈现典型的东向流动,跨PF的涡旋主要呈现出东北或东向,这与徐茗等^[42]的观点契合。另外,徐茗等^[42]的研究也表明,短生命周期CE略倾向于向赤道偏转,AE略倾向于向极地偏转,这与本文中跨PF和SACCF的涡旋中低纬向CE数量在总涡旋数量上占主导的结果一致,同时在一定程度上支持了高纬向涡旋中AE数量占主导的结果。

3.5 涡旋对海洋内部水文结构的影响

涡旋活动伴随着其内部独特的水文结构特征。图8显示了从Argo浮标数据中提取出来的两组同一时期邻近的CE(冷涡)和AE(暖涡)内部水文剖面结果。从图中可知,C1和A1分别位于相邻的CE和AE内部,在 $0\sim 1\ 000\times 10^4$ Pa范围内,C1整体温度比A1低,在海表处低 2°C ,在 $50\times 10^4\sim 400\times 10^4$ Pa处有明显的冷水团出现,与同深度的A1温差接近 4°C 。在盐度剖面中,近 350×10^4 Pa以浅C1盐度要低于A1,之后C1盐度高于A1。另一组C2和A2分别位于CE和AE边缘内侧处,C2在 $0\sim 2\ 000\times 10^4$ Pa上温度都比A2低,与C1有着类似的特征,在 150×10^4 Pa附近有冷水核心,A2温度则从海表缓慢下降,与A1剖面相近。因Argo测得的A2盐度值有误,未能用于比较。C2在海表附近有着低盐特征,但在 $100\times 10^4\sim 200\times 10^4$ Pa上盐度骤增, $200\times 10^4\sim 1\ 400\times 10^4$ Pa相比同深度C1盐度也要大很多,到 $1\ 400\times 10^4$ Pa左右盐度才逐渐与C1靠近。综上,尽管从涡旋产生位置来看,这两

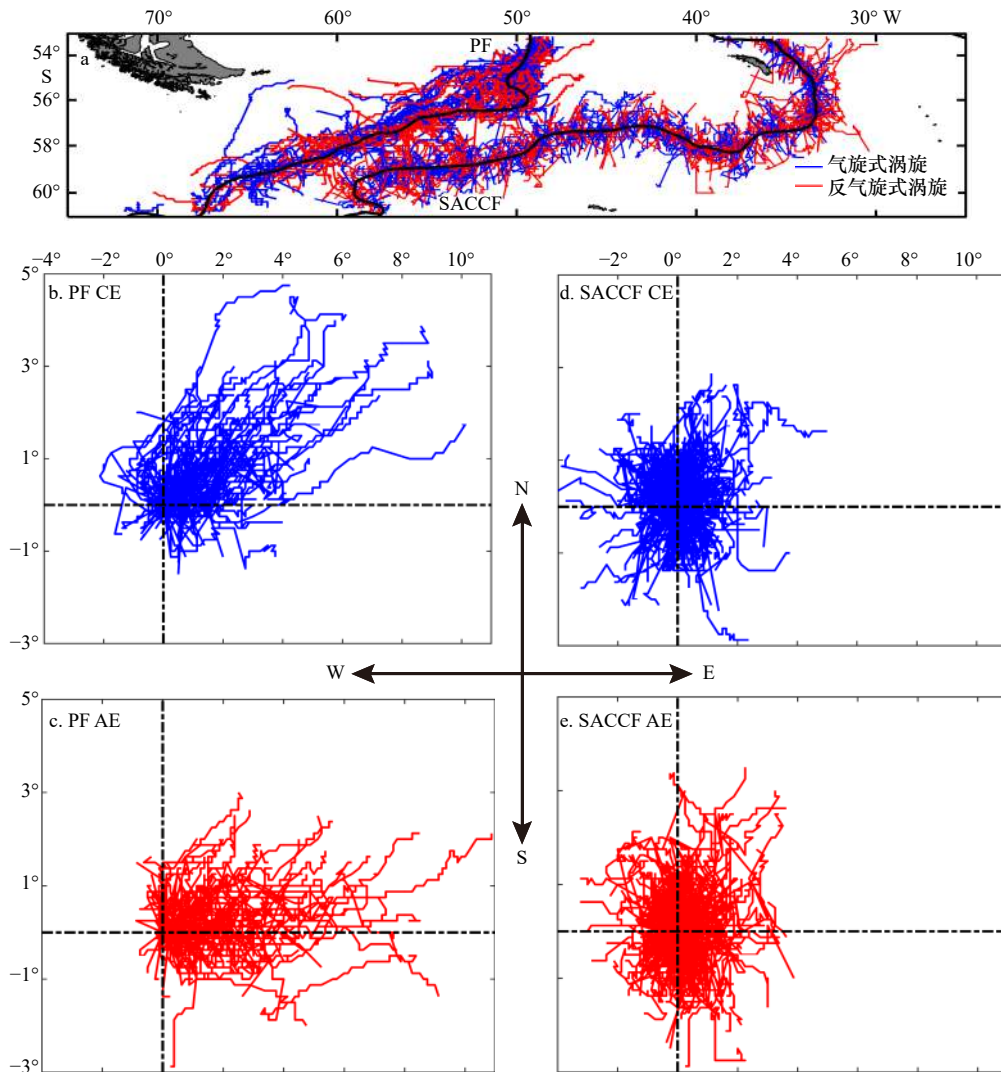


图 7 跨锋面涡旋的移动轨迹

Fig. 7 Moving trajectories of cross-frontal eddies

a. 跨极锋(PF)和南极绕极流南锋(SACCF)的总涡旋移动轨迹; b. 跨PF的气旋(CE)相对移动轨迹; c. 跨PF的反气旋(AE)相对移动轨迹; d. 跨SACCF的气旋(CE)相对移动轨迹; e. 跨SACCF的反气旋(AE)相对移动轨迹

a. Total eddy trajectories across Polar Front (PF) and Southern Antarctic Circumpolar Current Front (SACCF); b. the relative movement trajectories of CE across PF; c. the relative movement trajectories of AE across PF; d. the relative movement trajectories of CE across SACCF; e. the relative movement trajectories of AE across SACCF

组 CE 和 AE 之间并没有较大经向差异 ($<2^\circ$), 但它们内部从海表延伸至 1000×10^4 Pa 以深都存在显著的水文结构差异。结合南大洋水团分布特征^[43], 可知 CE 内部次表层具有延伸自南极大陆架的低温冬季水 (Winter Water, WW) 特征, 反之 AE 内部次表层仅存有较高温高盐的水团。可以初步推测来自南侧高纬的水团被 CE 携带, 而 AE 内部水团则来自北侧低纬海区。

为了更加深入了解涡旋内部结构, 根据 CCHDO 提供的 CTD 站点, 本文追踪了斯科舍海两个穿过站点的气旋式冷涡, 它们在生命周期内的移动和变形过

程在图 9 中展示。第 1 个冷涡于 2015 年 12 月 16 日产生 (图 9a1), 向东北方向移动, 于 2016 年 1 月 12 日与其南边更大的一个冷涡合并后消失 (图 9a6)。第 2 个冷涡于 2013 年 2 月 12 日产生 (图 9b1), 在接下来的时间里向东移动, 期间与东侧的一个冷涡分支合并, 并移动近 6° 后消失 (图 9b6), 其生命周期内负 SLA 信号相对较弱且面积也较小。随后计算这两个涡旋内部位温、盐度和位密的异常值 (涡旋内部数值减去背景场数值), 以观察涡旋对海洋内部温盐特性再分配的作用, 所选择的背景场数据为图 9a1 中的黄色实心点, 该点为所选断面中靠近两个涡旋边缘处

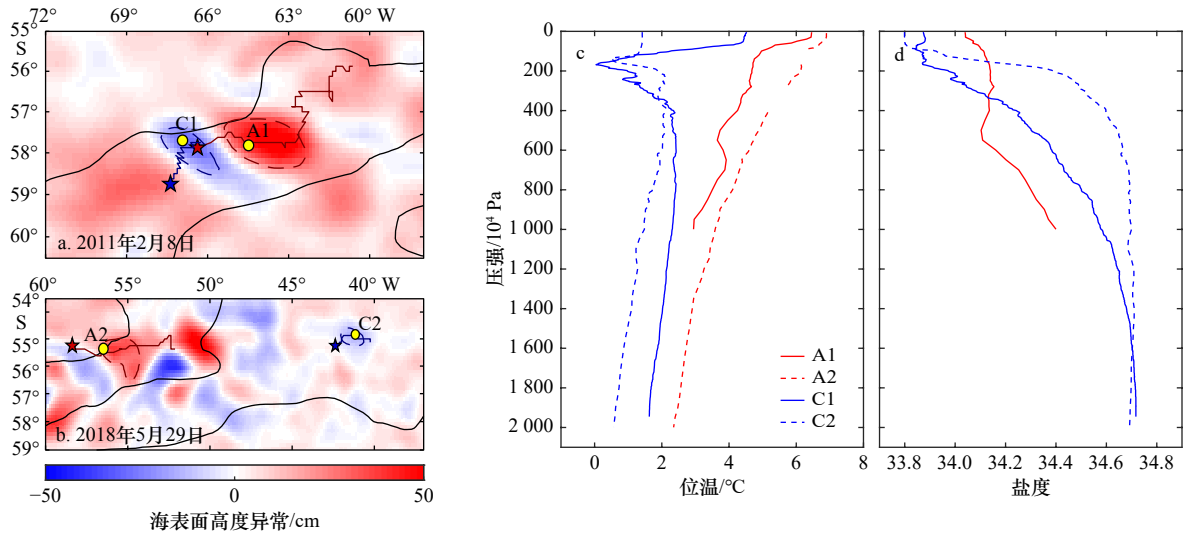


图 8 两组同时期邻近气旋式和反气旋式涡旋内部温盐特性比较

Fig. 8 Two groups of comparison of the potential temperature and salinity between adjacent cyclonic and anticyclonic eddies

A2 涡旋盐度数据有误, 故没有绘制。a 和 b 中蓝色(红色)虚线为对应时间内气旋(反气旋)涡旋所处位置和形状, 蓝色(红色)实线为气旋(反气旋)生命周期内的移动轨迹, 蓝色(红色)五角星为气旋(反气旋)第 1 天出现的位置, 黄色实心点为 Argo 浮标站点, 黑色实线为锋面, 自上而下分别为亚南极锋(SAF)、极锋(PF)和南极绕极流南锋(SACCF)

Salinity of A2 is omitted due to bad data. The dotted lines in blue (red) in a and b are the positions and shapes of cyclonic (anticyclonic) eddies in the corresponding time, the solid blue (red) lines are the movement of the cyclone (anticyclone) eddies during their life cycle, the blue (red) stars are the position of the cyclone (anticyclone) eddies on the first day, the yellow solid dots are the Argo stations. The solid black lines are the fronts, which are Sub-antarctic Front (SAF), Polar Front (PF) and Southern Antarctic Circumpolar Current Front (SACCF) from top to bottom

(SLA 接近 0 cm) 的站点, 与涡旋内部有较大差异。

图 10 显示了上述两个冷涡的位温、盐度和位密的断面结构(等值线)及这 3 个特征量的异常值(背景颜色)。由 SLA 值(图 9a5、图 9b5 和图 10a1、图 10b1)可知, 2016 年涡旋中心位于站点 5 附近, 2013 年涡旋中心位于站点 11 附近, 且前者强度较后者大。断面结果显示, 2016 年冷涡的冷核中心处于 138×10^4 Pa 深度, 具有最低位温 1.38°C , 对应盐度为 33.86。该处位温异常(a_θ)达 -3.36°C , 盐度异常(a_s)为 -0.28 。2013 年冷涡的冷核中心处于 184×10^4 Pa 深度, 具有最低位温为 2.07°C , 对应盐度 34.0。该处位温和盐度异常分别为 -2.61°C 和 -0.12 。另外, 结合图 9 可知, 这两个冷涡的冷核中心温盐负异常均与同断面南侧冷涡的情况(站点 8 和站点 14)一致, 只是相较之下负异常幅度较小。在位密断面上, 未出现冷核中心对应的显著异常。而在两个断面的 500×10^4 Pa 以深, 冷涡中心的站点 5 和站点 11 处均出现了盐度和位密的显著正异常。其中, 2013 年涡旋的盐度和位密断面中, 站点 11 在 $550 \times 10^4 \sim 700 \times 10^4$ Pa 深度上出现盐度和密度正异常高值, 南侧冷涡对应的站点 14 也在该深度范围内达到盐度和密度正异常的最大值, 尽管同深度范围内南侧冷涡的正异常更显著, 但

两个站点对应的冷涡情况一致。这两个冷涡内部次表层温盐负异常与图 8 中 Argo 数据的冷涡结果基本一致, 进一步说明冷涡内部水体来自南侧高纬海区的普遍可能性。

涡旋在形成过程中, 可以将周围的水体携带并滞留在涡旋中心处, 当涡旋成熟后, 涡旋中心的水与边缘的水之间几乎不会发生交换^[44]。在南大洋, 由于强大的纬向锋面结构, 海洋内部水团和温、盐分布在经向上具有明显特征^[43]。本文显示, 冷涡携带了高纬的低温、低盐 WW 并将其滞留, 使其随涡旋的移动而移动; 反之, 暖涡携带了低纬的较高温、高盐的次表层水并将其滞留和输运。Swart 等^[7]对西南印度洋一个冷涡的研究中发现, 该涡旋将高纬的温度和盐度异常向低纬移动了 1.5° , 还表明在西南印度扇区的南极表层水(Antarctic Surface Water, AASW)每年向北的流量中涡旋的贡献达到了 2.5%。Cotroneo 等^[45]也观察到一个由 PF 中脱离的冷涡向 SAF 移动。Morrow 等^[16]对 SAF 区域 8 年时间序列的冷涡进行观察研究, 发现每年均有携带盐度负异常水体的涡旋由 SAF 中脱离并向亚南极区域移动。尽管本节呈现的几个涡旋在经向上移动特征不明显, 但是结合 3.4 节中冷涡有着向低纬移动的趋势, 而高纬向移动涡旋中暖涡占主导

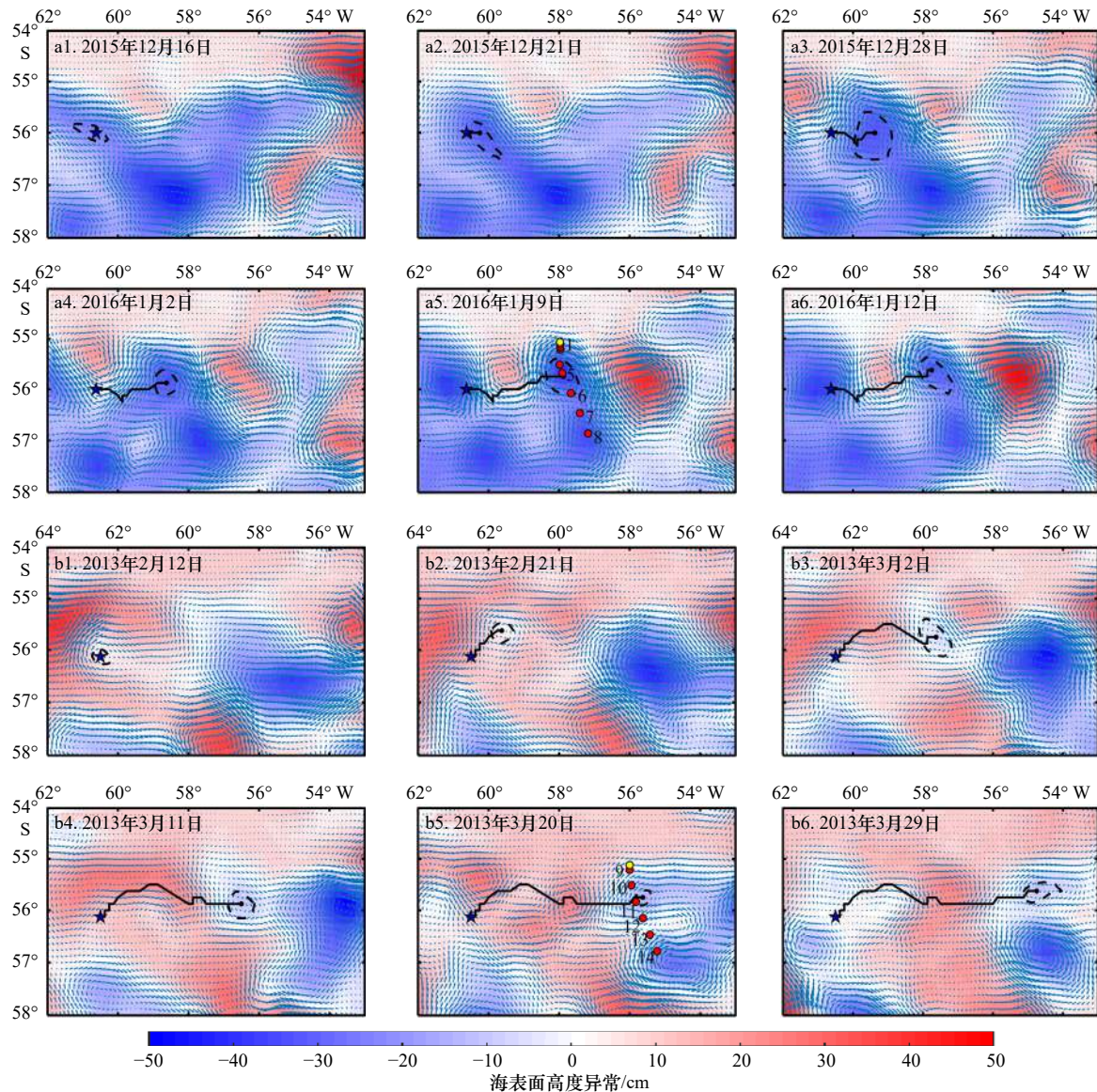


图9 两个涡旋移动轨迹和CTD站点分布

Fig. 9 Movement trajectories of two eddies and CTD stations distribution

蓝色箭头为地转流速异常分布; 黑色实线为所研究涡旋的移动轨迹; 蓝色五角星为涡旋产生时所处的位置; 虚线为该涡旋在对应时间内所处的位置和形状; 黑色实心点为当天的涡旋中心; a5和b5为CTD站点分布, 其中红色实心点为断面站点, 黄色实心点为所选择的背景场

The blue arrows show the distribution of geostrophic velocity anomalies; the solid black lines show the trajectories of the studied eddies; the blue stars are the position of the eddy on the first day; the dotted lines are the positions and shapes of eddies in the corresponding time; black solid points indicate the eddy centers in the corresponding time; a5 and b5 are the distribution of the CTD stations, while red solid points are the section stations, and yellow solid points are the selected background field

地位的结果, 说明涡旋对斯科舍海水团的移动和热盐的再分配作用无疑不可忽视。

4 总结与展望

利用基于流场几何特征的涡旋探测方法, 本文选取2005–2019年的AVISO卫星高度计融合数据对南大洋斯科舍海域内的涡旋进行了识别与追踪, 根据探测结果统计了涡旋半径、传播距离、生命周期等特征

参数, 且分析涡旋的地理分布特点、跨锋面情况、移动特性及涡动能分布和变化。同时, 研究结合Argo浮标数据和CCHDO断面数据对涡旋内部水文特征进行了分析。结果发现:

(1) 斯科舍海的涡旋多为短寿命涡旋(<30 d), 平均半径在 $10\sim 30$ km之间, 这可能与高纬海区较大科氏参数下的ACC背景流速有关。

(2) 不同生命周期的涡旋, 具有显著不同的产生

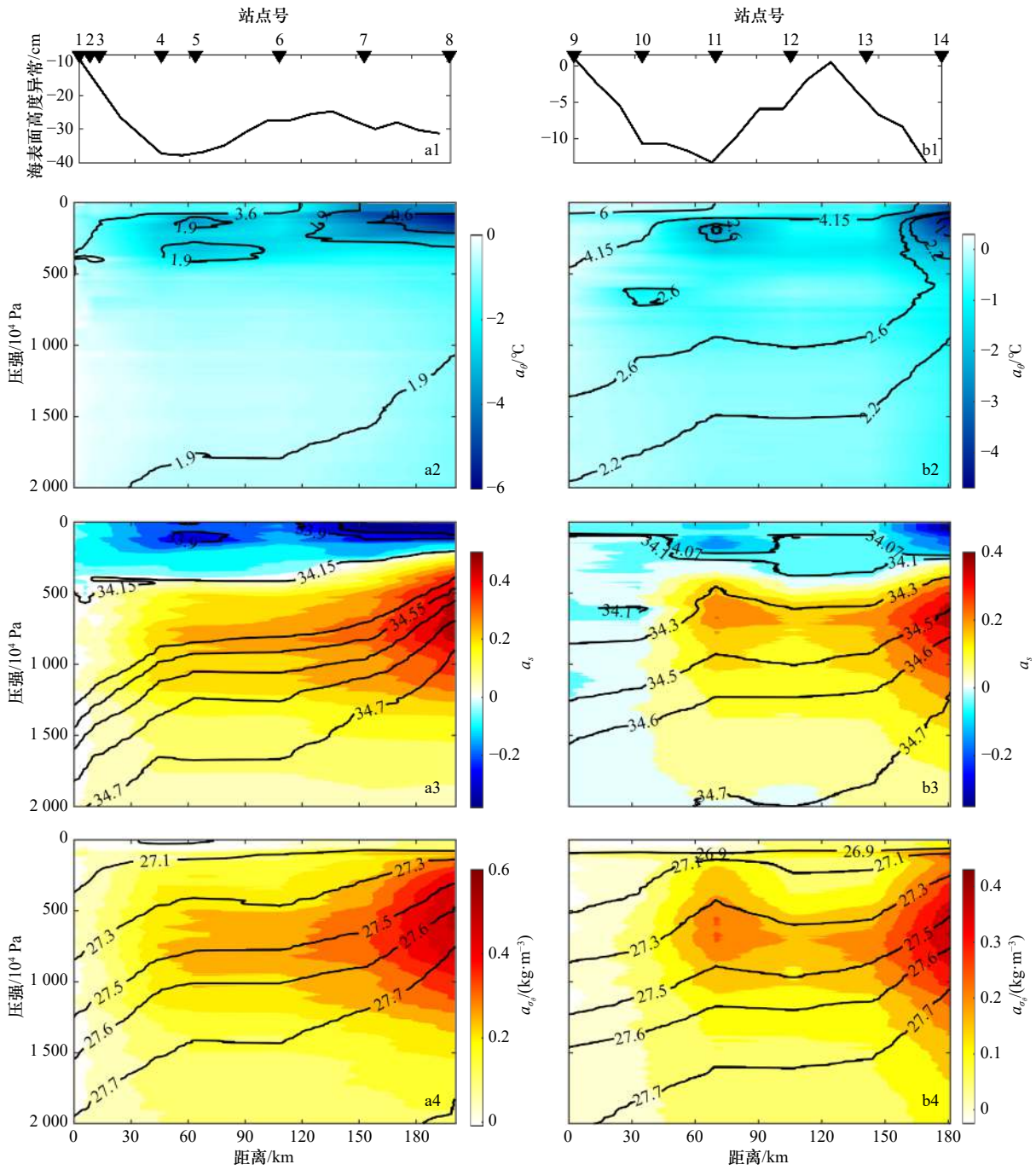


图 10 2016 年和 2013 年两个断面对应的海表面高度异常分布 (a1, b1)、位温 (θ) 及其异常值 (a_θ) (a2, b2)、盐度 (S) 及其异常值 (a_s) (a3, b3) 和位密 (σ_θ) 及其异常值 (a_{σ_θ}) (a4, b4) 的垂直断面图

Fig. 10 Sea level anomaly distributions along the two sections obtained in 2016 (a1) and 2013 (b1), the vertical section of potential temperature (θ) and their anomalies (a2, b2), salinity (S) and their anomalies (a3, b3) and potential density (σ_θ) and their anomalies (a4, b4)

断面图中等值线表示各自大小, 背景颜色为它们的异常值

The isolines being the values of θ , S and σ_θ while the background colors being the anomalies of potential temperature (a_θ), salinity (a_s), and potential density (a_{σ_θ})

热点区域, 随着生命周期的增大, 涡旋主要集中在斯科舍海中的 PF、SACCF 和 SAF 附近。进一步分析发现这可能是因为涡旋产生地与水深存在着一定对应关系有关, 斯科舍海有近 58% 的涡旋产生在 3 000~5 000 m 深的海域。

(3) EKE 高值聚集在斯科舍海盆最深处, 且 EKE 年际异常和 SLA 绝对值异常在 2016 年后都显示出明显的正异常, 这与 2016 年之后南极大气环境改变和海冰覆盖急剧减少具有时间对应性。

(4) 跨 PF 和 SACCF 的涡旋中, 低纬向的 CE 在数

量上占主导地位(35.2%),其次为低纬向的 AE 数量,占总数的 30.7%。跨两锋面的高纬向涡旋数量相对较少,且 AE 占主导。结合涡旋内部水文特性结果,可以推测在斯科舍海 CE 携带南侧次表层低温低盐水团向北输送,AE 携带北侧高温高盐次表层水向高纬输

送,这将对水团的移动和热盐的再分配有着重要影响。

本文对斯科舍海的 EKE 年际变化规律及涡旋内部水文结构特征进行了检测分析,为进一步掌握南大洋海洋-大气相互作用和涡旋对物质能量的跨锋面输送作用提供基础支撑。

参考文献:

- [1] Frenger I, Münnich M, Gruber N, et al. Southern ocean eddy phenomenology[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(11): 7413–7449.
- [2] Abernathey R, Marshall J, Mazloff M, et al. Enhancement of mesoscale eddy stirring at steering levels in the Southern Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(1): 170–184.
- [3] Nikurashin M, Vallis G K, Adcroft A. Routes to energy dissipation for geostrophic flows in the Southern Ocean[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(1): 48–51.
- [4] Muhling B A, Beckley L E, Olivar M P. Ichthyoplankton assemblage structure in two meso-scale Leeuwin Current eddies, eastern Indian Ocean[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(8/11): 1113–1128.
- [5] Okubo A. Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences[J]. *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1970, 17(3): 445–454.
- [6] Isern-Fontanet J, García-Ladona E, Font J. Vortices of the mediterranean sea: an altimetric perspective[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36(1): 87–103.
- [7] Swart N C, Ansoerge I J, Lutjeharms J R E. Detailed characterization of a cold Antarctic eddy[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C1): C01009.
- [8] Ivanov Y A, Krasnopevtsev A Y, Morozov Y G, et al. A cyclonic frontal eddy in the Antarctic circumpolar current[J]. *Oceanology*, 1985, 25: 22–25.
- [9] Joyce T M, Patterson S L, Millard Jr R C. Anatomy of a cyclonic ring in the drake passage[J]. *Deep-Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 1981, 28(11): 1265–1287.
- [10] Jayne S R, Marotzke J. The oceanic eddy heat transport[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(12): 3328–3345.
- [11] Trani M, Falco P, Zambianchi E. Near-surface eddy dynamics in the Southern Ocean[J]. *Polar Research*, 2011, 30: 11203.
- [12] Patel R S, Phillips H E, Strutton P G, et al. Meridional heat and salt transport across the subantarctic front by cold-core eddies[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, 124(2): 981–1004.
- [13] Korb R E, Whitehouse M. Contrasting primary production regimes around South Georgia, Southern Ocean: large blooms versus high nutrient, low chlorophyll waters[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2004, 51(5): 721–738.
- [14] Bernard A T F, Ansoerge I J, Froneman P W, et al. Entrainment of Antarctic euphausiids across the Antarctic Polar Front by a cold eddy[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2007, 54(10): 1841–1851.
- [15] Barker P F. Scotia Sea regional tectonic evolution: implications for mantle flow and palaeocirculation[J]. *Earth-Science Reviews*, 2001, 55(1/2): 1–39.
- [16] Morrow R, Donguy J R, Chaigneau A, et al. Cold-core anomalies at the Subantarctic front, south of Tasmania[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2004, 51(11): 1417–1440.
- [17] Korb R E, Whitehouse M J, Ward P. SeaWiFS in the Southern Ocean: spatial and temporal variability in phytoplankton biomass around South Georgia[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, 51(1/3): 99–116.
- [18] Ferrari R, Provost C, Park Y H, et al. Heat fluxes across the Antarctic circumpolar current in Drake Passage: mean flow and eddy contributions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(9): 6381–6402.
- [19] Hill S L, Reid K, North A W. Recruitment of mackerel icefish (*Champscephalus gunnari*) at South Georgia indicated by predator diets and its relationship with sea surface temperature[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, 62(11): 2530–2537.
- [20] 刘慧, 朱国平. 近百年来南极磷虾分布冷热点的时空变动[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 1015–1022.
Liu Hui, Zhu Guoping. Spatial-temporal variation in hotspot and coldspot of Antarctic krill distribution in recent 100 years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3): 1015–1022.
- [21] Kahru M, Mitchell B G, Gille S T, et al. Eddies enhance biological production in the Weddell-Scotia Confluence of the Southern Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(14): L14603.
- [22] 崔伟, 王伟, 马毅, 等. 基于1993–2014年高度计数据的西北太平洋中尺度涡识别和特征分析[J]. *海洋学报*, 2017, 39(2): 16–28.
Cui Wei, Wang Wei, Ma Yi, et al. Identification and analysis of mesoscale eddies in the Northwestern Pacific Ocean from 1993–2014 based on altimetry data[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(2): 16–28.
- [23] 胡冬, 陈希, 赵艳玲, 等. 两个西边流延伸体区域中尺度涡统计特征分析[J]. *海洋学报*, 2018, 40(6): 15–28.
Hu Dong, Chen Xi, Zhao Yanling, et al. Statistical characteristics of mesoscale eddies in the two western boundary current extension re-

- gions[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(6): 15–28.
- [24] 汤博, 侯一筠, 殷玉齐, 等. 北太平洋副热带逆流区中尺度涡旋的统计特征及其分布规律[J]. *海洋与湖沼*, 2019, 50(5): 937–947.
Tang Bo, Hou Yijun, Yin Yuqi, et al. Statistical characteristics of mesoscale eddies and the distribution in the North Pacific subtropical countercurrent[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50(5): 937–947.
- [25] 胡松, 李敏华, 刘必林, 等. 黑潮延伸体区域叶绿素季节变化以及中尺度涡对其影响机制研究[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(6): 1370–1378.
Hu Song, Li Minhua, Liu Bilin, et al. Seasonal characteristics of Chlorophyll *a* concentration in Kuroshio extension and influences of mesoscale eddies[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(6): 1370–1378.
- [26] 刘瑜, 郑全安, 李晓峰. 西北太平洋柔鱼渔场分布与涡动能变化的相关关系[J]. *海洋学报*, 2020, 42(2): 44–51.
Liu Yu, Zheng Quanan, Li Xiaofeng. Relationship between neon flying squid *Ommastrephes bartramii* fishery distribution patterns and eddy kinetic energy in Northwest Pacific Ocean[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(2): 44–51.
- [27] 郑晓莉, 董庆, 樊星. 北太平洋中尺度涡海表温度和叶绿素浓度特征分析[J]. *遥感学报*, 2020, 24(1): 85–96.
Zheng Xiaoli, Dong Qing, Fan Xing. Characteristics of sea surface temperature and chlorophyll concentration inside mesoscale eddies in the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(1): 85–96.
- [28] 曾伟强, 张书文, 马永贵, 等. 1993–2017年南海中尺度涡特征分析[J]. *广东海洋大学学报*, 2019, 39(5): 96–106.
Zeng Weiqiang, Zhang Shuwen, Ma Yonggui, et al. Analysis of mesoscale eddy characteristics in the South China Sea from 1993 to 2017[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2019, 39(5): 96–106.
- [29] 祖永灿, 孙双文, 赵玮, 等. 南海中尺度涡上海面热通量异常的季节变化[J]. *海洋科学进展*, 2019, 37(1): 11–21.
Zu Yongcan, Sun Shuangwen, Zhao Wei, et al. Seasonal characteristics and mechanism of the sea surface heat fluxes associated with mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(1): 11–21.
- [30] 白志鹏, 韩君, 郭贤鹏, 等. 基于CORA2再分析数据的南海中尺度涡时空分布特征初步研究[J]. *海洋预报*, 2020, 37(2): 73–83.
Bai Zhipeng, Han Jun, Guo Xianpeng, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of mesoscale eddies in the South China Sea based on the CORA2 reanalysis data[J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(2): 73–83.
- [31] Vaughan D G, Marshall G J, Connolley W M, et al. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic peninsula[J]. *Climatic Change*, 2003, 60(3): 243–274.
- [32] 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.
- [33] 董昌明, 蒋星亮, 徐广珺, 等. 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*, 2017, 35(4): 439–453.
Dong Changming, Jiang Xingliang, Xu Guangjun, et al. Automated eddy detection using geometric approach, eddy datasets and their application[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(4): 439–453.
- [34] 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.
- [35] Sun Wenjin, Dong Changming, Tan Wei, et al. Vertical structure anomalies of oceanic eddies and eddy-induced transports in the South China Sea[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 795.
- [36] Orsi A H, Whitworth III T, Nowlin Jr W D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic circumpolar current[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1995, 42(5): 641–673.
- [37] 陈红霞, 林丽娜, 潘增弟. 南极绕极流研究进展综述[J]. *极地研究*, 2017, 29(2): 183–193.
Chen Hongxia, Lin Li'na, Pan Zengdi. An overview of Antarctic circumpolar current research[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2017, 29(2): 183–193.
- [38] Moore J K, Abbott M R, Richman J G. Location and dynamics of the Antarctic Polar Front from satellite sea surface temperature data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C2): 3059–3073.
- [39] Schlosser E, Haumann F A, Raphael M N. Atmospheric influences on the anomalous 2016 Antarctic sea ice decay[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(3): 1103–1119.
- [40] Turner J, Phillips T, Marshall G J, et al. Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(13): 6868–6875.
- [41] Armitage T W K, Bacon S, Ridout A L, et al. Arctic Ocean surface geostrophic circulation 2003–2014[J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(4): 1767–1780.
- [42] 徐茗, 陈戈, 彭琳. 短生命周期海洋涡旋的时空分布特征[J]. *海洋学报*, 2019, 41(9): 94–104.
Xu Ming, Chen Ge, Peng Lin. Temporal and spatial properties of short-life oceanic eddies[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(9): 94–104.
- [43] Carter L, McCave I N, Williams M J M. Chapter 4 circulation and water masses of the southern ocean: a review[J]. *Developments in Earth and Environmental Sciences*, 2008, 8: 85–114.
- [44] Ladd C, Mordy C W, Kachel N B, et al. Northern Gulf of Alaska eddies and associated anomalies[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2007, 54(4): 487–509.

- [45] Cotroneo Y, Budillon G, Fusco G, et al. 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*, 2013, 118(5): 2653–2666.

Distribution and the internal hydrographic characteristics of eddies in the Scotia Sea, Antarctica

Yan Chenbing¹, Cheng Lingqiao^{1,2,3}, Zhu Guoping^{1,2,4,5}

(1. *College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 2. *Center for Polar Research, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 3. *Demonstration Center for Experimental Teaching of Marine Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 4. *Polar Marine Ecosystem Laboratory, Ministry of Education Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 5. *National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*)

Abstract: Eddies in the Southern Ocean play a critical role in transporting material and heat across fronts. Scotia Sea is located downstream of the Drake Passage and is an important economic fishery area, hence study on the distribution and role of eddies in this region is of urgent importance. Based on satellite remote sensing data from 2005 to 2019, the characteristics of eddies are statistically calculated, including radius, propagation distance, and lifespan. Their spatial distribution, cross-front movement, and movement characteristics are also analyzed. Meanwhile, the internal hydrographic characteristics of eddies are analyzed based on profile data. Results show that about 92% of eddies have a lifespan shorter than 30 d, with an average radius between 10 km and 30 km. The generating location of eddies are mainly near Polar Front (PF), Southern ACC Front (SACCF), and Sub-antarctic Front (SAF), corresponding to the bottom depth ranging 3 000 m to 5 000 m. Large values of eddy kinetic energy (EKE) concentrate between PF and SAF due to the obstruction of the submarine ridges, and EKE reaches a significant positive anomaly after 2016. The number of equator-ward eddies is dominant in the eddies across PF and SACCF, with most being cyclonic eddies. Anticyclonic eddies are dominant in poleward eddies. The internal hydrographic structures of eddies show that temperature and salinity are relatively low in the subsurface layer of the cold eddies, consistent with the characteristics of water masses at high latitudes. While they are relatively high in the subsurface layer of the warm eddies. It suggests that cold eddies may carry water from high latitudes to low latitudes and warm eddies may carry seawater from low latitudes to high latitudes. This study provides a basis for further understanding of the characteristics of eddies in the Scotia Sea and their effects on the distribution of biological populations and material and energy transport.

Key words: Scotia Sea; ocean eddy; characteristic statistics; cross-frontal transport; vertical structure