



南极绕极流研究进展综述

陈红霞^{1,2} 林丽娜^{1,2} 潘增弟³

¹ 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;

² 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

³ 国家海洋局东海分局, 上海 200137)

提要 南极绕极流是自西向东横贯太平洋、大西洋和印度洋的全球性环流, 也是世界上唯一一支和地球上所有其他洋流都有关联的洋流。尽管对南极绕极流的观测和研究历史相对较短, 但是对其特征、变化和机制的研究已取得了许多重要进展, 对其在全球变化中的作用的研究也日益深入。南极绕极流成为海洋和大气科学领域的前沿研究内容。以绕极流锋面分布、流速特征、纬向输运、经向输运及其响应的动力机制为重点, 总结了过去数十年里对绕极流观测和理论的研究结果, 明确了研究中仍然薄弱的环节, 并提出了相应的工作建议, 以促进我国关于南极绕极流及相关海洋和大气过程的研究。

关键词 南极绕极流 南大洋 全球变化

doi: 10.13679/j.jdyj.2017.2.183

0 引言

南大洋是世界第五个被确定的大洋, 是世界上唯一完全环绕地球却未被大陆分割的大洋, 由南太平洋、南大西洋和南印度洋各一部分, 连同南极大陆周围的威德尔海、罗斯海、阿蒙森海、别林斯高晋海等组成。因其北边缺乏连续的陆地边界作为传统意义上的界限, 某些科学家不予承认。但由于这一水域气候方面的均一性、水体物理特性和生物区系的独立性、重要而多样的洋流系统, 以及在沟通三大洋方面的重要作用, 海洋学家们将其划为一个独立的海域。国际水文地理组织于 2000 年确定其为一个独立的大洋。

南大洋的北部边界在文献中多采用“副热带辐合线”来表示。副热带辐合线是一条海水等温线

密集带, 几乎连续不断地环绕南极大陆, 表层水温 12—15℃, 呈现明显的不连续性。因是水文界线, 平均地理位置随季节不同而变化于 38°S—42°S, 故南大洋的面积也不固定, 约为 7 700 万 km², 占世界大洋总面积的 22% 左右。

在南大洋, 除南极沿岸一小股流速很弱的东风漂流外, 其主流就是自西向东运动的南极绕极流(Antarctic Circumpolar Current, ACC)。ACC 的别名是西风漂流, 它是南大洋最为重要的环流。ACC 位于南半球 35°S—65°S 区域, 与西风带平均范围一致; 南极大陆附近的海水密度小于外部海域, 由此生成由西向东的地转流, 因此 ACC 是西风漂流与地转流合成的环流。ACC 是南大洋中最显著的流动, 也是世界上唯一环绕全球的海流。虽然其流速并不是很快, 平均流速为 15 cm·s⁻¹ 左右, 但随深度减弱很慢, 而且厚度很大, 因此

[收稿日期] 2016 年 1 月收到来稿, 2016 年 3 月收到修改稿

[基金项目] 海洋公益性行业科研专项(201405031)、国家高技术研究发展计划(863 计划)(2011AA090401)、极地战略基金重点项目(20150102)、国家重点基础研究发展计划(2010CB950301)和南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE01-01)资助

[作者简介] 陈红霞, 男, 1975 年生。研究员, 主要从事极地与区域海洋动力学研究。E-mail: chenhx@fio.org.cn

[通信作者] 林丽娜, E-mail: linln@fio.org.cn

具有巨大的流量。通过德雷克海峡的年平均流量估计为 100—150 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 堪称世界海洋最强流。

由于没有其他陆地与南极洲相连接, ACC 将温暖的海水与南极大陆相隔离, 使南极洲保持了其巨大的冰原。作为全球最大的环流, ACC 的存在既限制了热量向南极的输送, 又是全球洋盆之间相互联系的纽带; 它不仅是南大洋海气相互作用系统中极其重要的一部分, 还在南半球乃至全球的变化中扮演了重要的角色, 引起了极地海洋学家极大的研究兴趣。在过去的数十年里, 在各国和国际南极调查与研究项目的支持下, ACC 的研究一直是南大洋研究的重点。

最早用于 ACC 研究的数据是从航运和捕捞业船只运行记录中提取出来的。近年来, 各国南极科学考察的开展极大地丰富了直接观测数据, 特别是深海观测数据。时至今日, 为了更好地认识 ACC, 大量的外业调查工作包括水文调查、锚碇观测等主要集中在 800 km 宽的德雷克海峡内。例如, 国际南大洋研究项目(International Southern Ocean Studies, ISOS)特别强调了对德雷克海峡和新西兰东南部海域 ACC 输运、锋面和热力学的研究。极地海洋学家从理论研究、数值模拟以及现场观测资料分析等多个方面研究 ACC, 探讨 ACC 的动力机制、空间分布、发展和变化规律以及 ACC 对局部和全球气候系统的影响。

本文以现有南大洋绕极流观测断面为重点, 从锋面分布、流速特征、流速结构、纬向输运、经向输运、动力机制等方面对近些年来国内外学者对 ACC 的研究工作进行总结和评述, 从而确定我们对 ACC 认识的薄弱环节, 以促进我国在相关领域的研究。

1 锋面分布

尽管 ACC 非常长, 但是整个纬圈方向上 ACC 又表现出非常高的径向一致性, 在任一观测断面上均有相似的特征。Deacon^[1]最早注意到 ACC 区域从南向北盐度等值线和温度等值线存在一系列的向下倾斜现象, 温度和盐度等值线的倾斜意味着密度等值线的相应倾斜, 从而对应着强流的出现。ACC 的大部分输运与温、盐等值线

倾斜区域处的流速大值区(流核)有关, 流核之间由一条过渡带分开。在南半球, 高密度水位于南部, 对应着东向流, 据此从而容易确定横穿断面的流核位置。这些流核处是具有密度、温度、盐度或者营养盐等要素典型水平梯度的锋面; 锋面宽度相对较窄, 宽度约为 50—100 km; 至少在锋面上层水体中, 如温盐(T-S)特征关系会发生突变。

除德雷克海峡断面外, 横跨南大洋的断面密度分布显示, 3 个锋面分割出 4 个海洋带^[1]。这 3 个锋面从南向北依次是极锋(Polar Front, PF)、亚南极锋(Subantarctic Front, SAF)和亚热带锋(Subtropical Front, STF)。其中极锋对应着南极辐合带(Antarctic Convergence, AC), 亚热带锋对应着亚热带辐合带(Subtropical Convergence, STC)。这些锋面将各自不同的条带相互隔离, 每个条带都具有独特的温盐层化特征。

4 个水团条带从南向北依次是南极带(Antarctic Zone, AZ)、极锋带(Polar Front Zone, PFZ)、亚南极带(Subantarctic Zone, SAZ)和亚热带(Subtropical Zone, STZ)^[1]。在极锋以南的南极带上, 海表之下是温度低于 0°C 的冷水层, 这一冷水在表层生成, 大约 100 m 厚。从极锋和亚南极锋之间的极锋带上, 这一冷水沉降到 500 m 深, 向赤道方向一直到 ACC 以北沉降到 1 000 m 深处。这一水团是南极中层水, 在整个南半球扩展, 直到赤道甚至更北都可以追溯到它的极地性质^[2]。

当 ACC 挤压通过德雷克海峡时, 它几乎占据了整个海峡, 海峡内唯一的非 ACC 水体位于海峡南部边界^[2]。从威德尔海泄漏出来的冷且相对低盐的海水绕过南极半岛, 通过德雷克海峡向西流动, 与 ACC 的流动方向完全相反。这与整个南极沿岸主要是流速很弱的东风漂流相一致。在南极陆架海域主要是陆缘水(Coastal Water, CW), 而在陆源水北部边界处往往出现南北范围较为狭窄的密度等值线倾斜区域, 且这一倾斜区域与陆坡所在位置相对应, 也将这一等值线倾斜区域称为成为南极陆坡锋(Antarctic Slope Front, ASF)。

亚南极锋在印度洋和太平洋位于 48°S—58°S, 在大西洋位于 42°S—48°S^[1]。南极辐散带处曾被视为 ACC 的南部边界^[3], 但后来的分析将这一边界向极区推进。Orsi 等^[4]将 ACC 的南部边界定义

在绕极深层水($T>1.8^{\circ}\text{C}$)向极一侧的南部边缘。由此界定的南部边界为: 在 50°E 到国际日期变更线之间的印度洋和太平洋处位于 65°S 附近; 在国际日期变更线以东到 140°W 处向北移动到 60°S 附近; 在 120°W 处位于 70°S 附近; 在德雷克海峡以东向北移动到 60°S 附近; 在 10°E 处向北到达 55°S 。

Rintoul 等^[5]采用全球大洋环流实验(World Ocean Circulation Experiment, WOCE)6个航次的调查资料, 指出在 140°E 附近SR3断面上ACC主要锋面的位置是非常稳定的。亚南极锋平均位于 51°S — 52°S ; 极锋的北部分支位于 53°S — 54°S , 极锋南部分支位于 59°S 附近。

高郭平等^[6]根据中国南极科学考察队在南印度洋从中山站外普里兹湾到澳大利亚弗里曼特尔断面的水文资料, 分析了南印度洋东部海洋锋的位置及其年际变化。在 75°E — 78°E 范围内, 南极陆坡锋的位置在 64.5°S — 65.5°S ; 在 84°E — 100°E 范围内, 极锋在 53.5°S — 54.3°S 附近; 在 96°E — 103°E 范围内, 亚南极锋在 46.0°S — 47.0°S 附近; 在 110°E 附近, 亚热带锋在 37.2°S — 38.0°S ; 极锋的位置存在1个纬距以上的年际变化。

贺志刚等^[7]利用剖面浮标资料和上层温度资料给出了东南印度洋各主要海洋锋的位置、走向和季节变化。在凯尔盖朗海台以东海盆区, 冬季亚南极锋和极锋的路径均比夏季偏南, 在其他海域两者路径的季节差别不大。亚热带锋位于埃克曼抽吸导致的表层水辐聚区。亚南极锋的位置季节南北摆动幅度小于风应力零旋度线的季节摆动幅度, 夏季位置略偏于风应力正旋度区, 而冬季大多位于负旋度区。

在澳大利亚到南极(110°E 附近)航线海域, 基于第6、7次中国南极考察水文数据, 侍茂崇等^[8]指出亚热带锋有2个锋面结构。通过对第9次中国南极考察获得的相近断面的XBT资料, 苗育田等^[9]再次证实了亚热带锋具有2个锋带。于洪华等^[10]总结了1979—1992年间该断面上锋面位置的变化: 极锋的位置在 50.5°S — 51.5°S 变动, 强度为 0.08 — $0.26^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ km})^{-1}$; 亚南极锋的位置摆动幅度较大, 在 43.7°S — 49.2°S 变动, 强度为 0.10 — $0.34^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ km})^{-1}$; 亚热带锋的位置一般在 37°S — 40°S 变化, 但有些年份出现2个锋面。

随着资料多元性和充分性不断加强, 对绕极流的锋面结构也有了更加细微的认识。基于多年的海表温度和海面高度卫星遥感数据, Sokolov 等^[11]认为绕极流内存在多个射流区, 海面梯度场的分布特征也与对绕极流的传统认识不同。

2 流速特征

与其他海流不同, ACC是由两个甚至更多个与密度锋面相关联的海流组成, 这使得其在整体上呈现为绕极性。这一海流并不严格地绕纬圈线流动, 而是向南北两侧摆动。受到大陆架和洋中脊的约束, ACC向南的最大摆动分别出现在新西兰南部和德雷克海峡。在德雷克海峡的东部, 绕极流向北回转, 然后在南美洲的东海岸绕极流的一个分支向北延伸, 与南向的巴西海流相交汇。在绕极流的南部至少有两个顺时针亚极地流涡, 威德尔流涡和罗斯海流涡。目前尚不确定亚极地流涡的范围以及它们的数量, 在印度洋扇区可能有第三支流涡^[2]。

基于站位观测数据, Gordon 等^[12]给出了以1 000 dbar为参照面的海表地转流分布情况, ACC的基本特征清晰可见。在地形的影响下, 绕极流的位置随之变化; 绕极流具有显著的多条带结构, 各条带的宽度有显著不同。在整个南大洋中, 极锋和亚极锋处的两支海流平行于环绕着南极大陆的大洋中脊流动。Orsi 等^[4]利用南大洋的历史水文数据描述了南极绕极流的大尺度特征: 相对于1 000 dbar的海表面重力位势异常揭示了ACC东向流的强剪切和南极周围海脊系统对海流方向的强引导。

在世界海洋环流实验(WOCE)的框架下, 将表层拉格朗日测流方式应用到南极绕极流观测中, 得到了WOCE漂流浮标数据集, 进而插值得到高分辨率平均海表流场, 这使得对ACC的详细描述特别是其经向切变和射流的描述成为可能^[13]。这些基于漂流浮标得到的南大洋太平洋扇区的绕极流信息, 为研究者提供了清晰的ACC多射流结构和经向剪切现象, 以及海底地形对表面流驱动作用的佐证。在漂流浮标对海流矢量采样比较充分的区域, 海流平均场与已有流场认识是一致的^[4,14]。尤为突出的是, 在各经线断面上的流速极大值与锋

面系统是对应的。平均流场在 ACC 边界和流速极大值上与 Orsi 等^[4]对 SAF、PF、SF 位置的界定是紧密相关的。

Gille^[15]通过分析 GEOSAT 高度计数据, 进一步证实了 ACC 内的 2 支界限清楚的射流分别位于极锋和亚南极锋上, 其宽度为 35—50 km, 伴随的主导弯曲波长为 150 km 左右。

在锋面附近, 东向强流的流速是锋面间流速的 2—3 倍^[16]。Hofmann^[17]对漂流浮标的分析表明在亚热带锋处平均流速为 $20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 在亚南极锋和极锋处为 $40 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 在锋面之间为 $23\text{—}35 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

以德雷克海峡高密集度(55—110 km)的直接海流观测结果为依据, Nowlin 等^[18]指出绕极流内有 3 支非常清晰的垂向流条带, 条带内东向流速较高, 从北向南依次为 $30 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $30 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

Gladyshev^[19]通过对 2 个德雷克海峡调查断面上 100—800 m 层南极绕极流的时空变化分析, 确定了亚南极和极地超强射流的存在, 这两个超强射流是由多个射流汇合而成。ACC 射流在垂直方向上是高度一致的。在海底地形上升的地方, 由于跨越导致射流加强, 上层输运增加。

射流内的表层流速最大约为 1.5 节, 这比湾流要小得多。与湾流不同的是, 这一东向的射流在整个绕极流范围内均直达海底。在南美洲南部的一个海流记录揭示了 3 000 m 深处的年平均流速超过 0.25 节^[2]。

3 纬向输运

基于 ACC 输运在全球大洋环流和气候变化中的重要意义, 流量研究特别是纬向输运是 ACC 研究中最为热点的问题, 多数关于 ACC 的研究是围绕或者涉及这一问题。尽管 ACC 在锋面之间的纬向流速相对较小, 但随深度减弱很慢, 而且厚度很大(从海表一直延伸到 2 000—4 000 m 深), 流幅最宽可达 2 000 km, 这一巨大的横断面为海流的大输运量提供了空间, ACC 的纬向输运量比地球上其他任何一支海流都大。

已有对 ACC 流量的研究存在多个不同的结果。早期对 ACC 输运的估算依赖于参考面的选择, 随选择的参考面不同而有较大区别。由于 ACC 锋面处的地转切变几乎延伸到海底, 在中间层面

选择零流面将会导致东向流下出现西向逆流, 从而使流量估算偏低。此外, 在德雷克海峡以外的其他区域进行 ACC 流量估算时, 难以将 ACC 与其他相邻的海流完全分开。在开阔海域, 包括亚热带环流的南部分支和亚极地环流的北部分支在内的两个东向流都难以与 ACC 相区分。此外, 澳洲和非洲以南的其他海流系统, 如厄加勒斯洋流的存在也增加了区分的难度。

基于已有的调查数据, 德雷克海峡处的 ACC 运输观测和研究最为充分。1975 年启动了在德雷克海峡对 ACC 的综合研究, 这是国际南大洋研究项目(ISOS)的一部分。在 6 年的时间里, 利用 7 条不同的船只完成了 11 个调查航次, 获得的大量数据直到现在仍在被分析使用。在这一项目执行的最后一次实验中, 共有 91 台设备被布放在德雷克海峡的 24 个年周期的锚碇观测点上。尽管这一年得到的绕极流流量数值至今已有 40 余年的历史了, 但它仍是一个可靠的流量估算值, 并据此首次开展了流量变化研究^[2]。

基于 1975 年观测数据的几个流量计算结果包括: $110\text{—}138 \text{ Sv}$ ^[18], $139\pm 36 \text{ Sv}$ ^[20] 及 $127\pm 14 \text{ Sv}$ ^[21]; 所有结果均为东向流, 且一致性程度非常高。基于 1979 年 1 月—1980 年 1 月的在海峡两侧及在海峡内布放的锚碇观测阵列记录, 2 500 m 层以上的平均净输运量为 125 Sv, 标准偏差为 10 Sv^[22-23]。

以锚碇海流记录为参照, 基于在 1979 年 1 月、4 月和 1980 年 1 月完成的 3 个航次调查数据计算出的地转流输运量分别为 117 Sv、144 Sv 和 137 Sv; 以 3 000 db 为参考面, 在 1975、1976、1977、1979 和 1980 年的 7 次断面考察结果表明, 通过德雷克海峡的地转流是斜压的, 且输运量是相对稳定的, 平均为 103 Sv^[22]。这与 Reid 和 Nowlin^[24]最初采用直接测流数据对德雷克海峡观测断面的研究结果是一致的。Whitworth^[22]减去了 2 500 m 层以下的流量, 得出前 2 个航次的流量是 113 Sv 和 127 Sv。这些输运量数值与基于锚碇观测阵列数据得到的净输运具有非常好的可比性, 对应时间的净输运量分别为 112 Sv 和 121 Sv。

Nowlin 等^[25]的研究结果表明, 以 2 500 db 为参照面, 德雷克海峡内 3 个锋面上的输运量占全部斜压流输运的 75%, 锋面间的输运量只占到输运量的 20%。从 1981 年 3 月—1982 年 3 月的压

力记录显示了由压力换算出的流量介于95—158 Sv, 标准偏差为13 Sv^[23]。在德雷克海峡南、北两侧海底布放的压力计观测记录曾用来推算年时间长度的ACC输运量。以2 500 m为参考面, 2 500 m以上的平均流量为 87 ± 5.5 Sv, 变化范围为70—100 Sv^[22]。在德雷克海峡净流量平均为124.7 Sv, 标准差为9.9 Sv^[23]。相对于2 500 m及其以上的斜压流占总流量的70%, 大约35%的净流量位于500 m以深的斜压场中。虽然绝大部分南极绕极流输运是斜压的, 但流量的波动部分主要是正压的, 可在2周内波动近50%。近年来在德雷克海峡年周期长度的直接观测结果表明, ACC平均流量大致为134 Sv, 误差小于10%; 瞬时流量最大可以在平均值的基础上变化20%, 这些变化主要与2 500 m处的参考流的变化有关, 而小部分与流速垂直切变有关^[25]。

以3 000 m为参考面, Cunningham等^[26]的研究结果表明, ACC输运主要分布在两个射流区, 分别是亚南极锋(53 ± 10 Sv)和极锋处(57.5 ± 5.7 Sv); 德雷克海峡3 000 m以上的ACC斜压流为 107.3 ± 10.4 Sv, 而且在1975—2000年非常稳定。在1993—2000年间, 相对最深参考层的斜压流流量是 136.7 ± 7.8 Sv。Olbers等^[14]的研究进一步对这一结果予以肯定。

Chidichimo等^[27]首次给出了基于锚碇观测数据的德雷克海峡ACC斜压运输多年连续时间序列。2007—2011年, 相对于海底的全深度ACC斜压流输运为 127.7 ± 1.0 Sv, 标准差为8.1 Sv。年平均斜压输运非常稳定。亚南极锋和极锋占总斜压输运的80%左右。

尽管在德雷克以外的其他绕极流断面上尚没有直接海流观测, 但ACC的输运量研究也有开展。Georgi等^[28]估算了美洲、非洲和新西兰南部绕极流断面上的输运量, 并与以其他方法开展的跨洋输运进行比较。他们采取最深观测层作为参照面计算了ACC流量, 结果表明在非洲和新西兰以南的输运量分别为140 Sv和125 Sv。Swart等^[29]利用18个XBT断面调查资料对好望角以南的格林威治线断面上的流量计算结果是 90 ± 2.4 Sv(以2 500 dbar为参考面)和 145 ± 3.9 Sv(以海底为参考面), 这一数值与基于CTD调查数据计算得出的平均斜压流流量相当(87.9 ± 3.9 Sv)。Park等^[30]

利用从非洲到南极洲的水文断面调查数据, 研究了30°E上的绕极流输运情况: ACC通过30°E断面的纬向输运量约为160 Sv, 且约70%集中在极锋附近。

近年来, 其他区域如塔斯马尼亚和新西兰以南的ACC断面也得以研究。基于观测资料得到的ACC平均输运量为100—150 Sv, 在1—2个月的时间内可以有50 Sv的变化^[31]。Rintoul等^[5]采用全球大洋环流实验(WOCE)140°E附近SR3断面上6个航次的调查资料, 研究了这一断面上的斜压流及其变化。以水团性质和浮标轨迹相一致的深水层为流速参考面, 全剖面的平均流量为 147 ± 10 Sv。ACC主要锋面的位置和流量都是非常稳定的: 亚南极锋平均位于51°S—52°S, 流量为 105 ± 7 Sv。极锋的北部分支位于53°S—54°S, 东向流量为 5 ± 5 Sv。极锋南部部分支位于59°S附近, 流量为 24 ± 3 Sv。ACC南部锋面还有2个流核, 分别位于62°S和64°S附近, 各自的流量为 18 ± 3 Sv和 11 ± 3 Sv。Damerell等^[32]首次采用基于下放式ADCP测流的地转切变对这一海域的总运输进行估算, 得出亚热带锋、亚南极锋和极锋北部分支的东向总输运量为 174 ± 22 Sv。与德雷克海峡处的输运量相比较, 总量为174 Sv的输运要多一些, 多出的15 Sv与印度尼西亚贯通流的流量相符合。以最深观测层面为参照的斜压输运量为119 Sv, 这与这一区域的其他斜压运输估计是一致的。

Orsi等^[4]利用多个断面调查站位资料, 得出在所有经圈上3 000 m以上的ACC东向输运约为100 Sv。Falco等^[13]通过浮标测流数据和流速垂向切变假设这一新方法, 估算的ACC平均流量为133 Sv。另外, 南极绕极流从非洲南部开始自西向东逐渐减弱^[33]。

4 经向输运

ACC在生态和水文环境上将南极与其他三个大洋亚热带海域相隔离, 但它在南极和亚南极之间并不是一个不可穿越的障碍。就像黑潮和湾流一样, 绕极流的主流核有时也发生卷曲现象, 从而形成独立的流环, 这些流环可以将南极的环境信息带到绕极流以北, 也可以将亚极地的环境

信息向南输运。由于可用于分析经向输运观测资料的局限性,对 ACC 经向输运的研究要比纬向输运的研究少得多,而且仅限于基于特定数据的特定区域。另外,在南极绕极流经向摆动的影响下,流核上的经向流速比纬向流速具有更加不稳定的特征^[33]。

南大洋经向流函数图上所显示的 Deacon 流环表明,至少在纬向积分的意义上存在着穿越 ACC 的经向物质输运,而且其方向为上层向北、中层向南。20 世纪初,有研究表明温暖的深水从热带、亚热带海域向南极输运,在南极洲附近向上延伸到较浅的深度,并被认为是与南极深层冷水的形成有关。Reid 等^[34]对这一现象的认识做了综述。Han 和 Lee^[35]给出的跨越极锋的埃克曼输运为 30 Sv,这与 de Szoeko 和 Levine^[36]的结果(28 Sv)非常接近。

从 ACC 锋面处脱离的流环被认为对跨越海流的输运占主导作用。Bryden 和 Heath^[37]利用新西兰东南部(49.5°S,170.0°W)的一个两年周期的锚碇观测记录,估算了 ACC 北边界处的经向输运量。由于通量值在长时间尺度内变化活跃,他们发现总体流涡通量没有统计学意义,尽管在 20—40 d 的带宽内是显著极向的。

基于冰-海等密度面模式,史久新等^[38]系统分析了南极绕极流的经向输运,研究表明:在南大洋的某些区域,ACC 表现出明显的非纬向性特征,尤其是位于印度洋区段的凯尔盖朗海台附近 ACC 有较强的经向分量。在 ACC 区,南向输运和北向输运是交错分布的。虽然大部分经向运动并未超出 ACC 的流幅范围,但是在某些特定区段如东南澳大利亚海盆附近,可能存在穿越 ACC 的经向物质交换的通道。南大洋存在若干经向流环,靠近南极大陆的极地流环可能与海冰过程有关。

McDonagh 等^[39]以 LADCP/VMADCP 测流结果为参照,采用逆方法对横跨印度洋的 32°S 断面进行地转流计算,结果显示出在南印度洋具有非常多的南向和北向流分支的复杂结构。并计算出在海盆西部的总体南向流量为 70 Sv,海盆东部的总体北向流量为 52 Sv。

Cotroneo 等^[40]采用了 1994—2010 年间 23 个 XBT 断面资料和卫星测高数据在对观测断面冷

核异常研究时,发现在东南印度洋 ACC 极锋区不断有旋涡生成,并明确指出流涡的贡献不仅包括它们可以穿越 ACC 的锋面,也包括它们内部水体性质保持不变。

总体上看,极锋南部海洋到大气的热输运和穿越锋面向赤道一侧的埃克曼输运造成了 ACC 以南的海洋热量和物质损失,AABW 在海洋底部进入中低纬度大洋,极向的热量和物质平衡须通过海洋过程完成。由于平均地转流的作用(除了可能存在的深层狭窄的海流)很小,涡旋过程和深层边界流是这一极向热输运的首要候选对象^[25]。

5 动力机制

位于 30°S 的大气高压槽与南极海岸附近低压槽导致南半球咆哮的西风带的产生。强劲的、近纬向的西风驱动了非常强的表面附近北向埃克曼输运和北向的压力梯度。ACC 的流动是准地转平衡的,横跨 ACC 等密度面倾斜与海表面高度相平衡。强西风对海表的推动作用与随之发生的地转流共同作用,使得 ACC 加强^[41]。在南半球的冬季,南极绕极流的流速随着西风的增强而增强^[33]。Whitworth^[22]比较了 1979 年德雷克海峡处的净输运与 43°S—65°S 的平均纬向风应力:对于 16—24 d 的周期,在 95%的显著水平上两个时间序列是相关的,且风应力序列在位相上领先净输运序列 17 d 左右。零风应力旋度的纬度向赤道一侧位移对应着弱的西向流,向南极一侧位移对应着强的西向流^[5]。

虽然过去数十年里 30°S—60°S 西风存在显著的强化,也有研究表明,南极绕极流输运和经向翻转对南大洋风应力年代际变化并不敏感^[42]。南极绕极流等密面坡度对风应力变化的不敏感性通常被认为是中尺度涡旋的作用,中尺度涡旋抵消了风驱动的埃克曼翻转环流^[43]。杨小怡等^[44]的研究表明,南极绕极流对风应力强迫存在两种响应,即正压过程的即时响应与斜压过程的延时响应。纬向风应力的增强导致南大洋等密面斜率加大,平均流更趋于斜压不稳定;斜压不稳定产生中尺度涡,使得平均流势能向涡旋能量转化,造成了 ACC 体积输运在时间上滞后两年的显著减弱。ACC-输运与纬向风应力的这种滞后反相关关系

可以很好地解释 ACC 体积输运在近 20 a 保持基本稳定的现象。

但这一西风的强度比产生 ACC 所需的风场要强的多。Whitworth^[21]认为阻止 ACC 变得更强的可能因素有 2 个: 一是南大洋海底洋中脊对海流的约束; 二则依赖于 ACC 并不是一直东向流这一观测结果, 如在新西兰和南美洲以南。在这些海域, ACC 通过小尺度的涡旋、湍流以及其他非线性作用耗散掉大部分能量。Wang 等^[45]则认为, 虽然西风强化使等密面倾斜加大, 通过埃克曼抽吸作用强化 ACC 输运, 但同时相应的浮力强迫减少了海表面的经向密度梯度。等密面倾斜加大使涡致输送加强, 这将减小等密面倾斜。这会使得亚南极锋向南移动, 极锋向北移动, 从而使得 ACC 流幅缩小, 从而减小 ACC 流量。如果妨碍 ACC 流量增大的作用强于埃克曼抽吸强化 ACC 的作用, 这样 ACC 输送将减弱。

对德雷克海峡 ACC 输运、跨海峡压力差异与南大洋风应力的长期观测数据的统计分析表明: 压力差异与绕极风应力之间存在强相关, 两者在约 15—30 d 的时间内是一致的, 风应力约超前 3 d^[22], 海流滞后风应力约 9 d^[46]。Chelton 等^[47]则认为基于统计的结果值得怀疑, 压力差异与绕极风应力之间的强相关很可能是由于两者均具备很强的季节信号。此外, 在 Fu 和 Chelton^[48]的研究中可以看出, ACC 大尺度的波动在绕极范围上可能并不是同步的。

通过直接观测获得到的平均流速垂向切变与地转流切变非常一致, 这意味着南极绕极流是地转平衡的; 虽然绝大部分南极绕极流输运是斜压的, 但流量的波动部分主要是正压的^[22]。在开阔海域, 狭窄射流的斜压不稳定与海洋涡旋的变化相一致。使用来自德雷克海峡的数据计算表明, 斜压不稳定和正压不稳定所需的条件在 ACC 内均可满足。尽管 ACC 的基本动态平衡仍不是非常清楚, 但底部地形、侧边界地形、动力不稳定性已被证明是平衡风场的重要因素^[25]。

Peterson^[49]对德雷克海峡绕极流流量进行谱分析, 然后对比了多年的海峡两侧压力计与南大洋上的风应力记录。分析表明, 季节内的 ACC 净输运变化主要受半月周期和月周期的潮汐变化, 以及北部通道内的斜压活动控制, 这些过程与风

场无关; 在季节时间尺度上, 输运变化主要呈现为正压的。通过压力和纬向平均风应力旋度时间序列的对比表明, 亚热带和亚极地大气压力系统强度的季节性波动导致了跨越绕极流方向的海表面坡度变化; 与亚热带高压旋度相关的占主导地位的年周期变化影响到整个 ACC 海平面, 而与亚极地低压旋度相关的占主导地位的半年周期变化主要局限在绕极流的南部部分。

南大洋海底地形对 ACC 的作用研究是较为充分的, Hofmann^[17]、Zambianchi 等^[50]都发现了南大洋海脊对海流的地形引导证据。当流经合恩角和南极半岛之间的德雷克海峡时, ACC 的路径受到陆地的约束。通过产生摩擦形式的阻力, 海底的经向海脊为大西洋绕极环流提供平衡力。当 ACC 跨越这些海脊时, 摩擦阻力(frictional drag)减弱了绕极流的深层流^[51]。在平均意义上, 由于大尺度的、缓慢的海流平行于行星涡度等值线, 底部地形同样还控制着 ACC 的路径。包括德雷克海峡、凯尔盖朗海台、坎贝尔海台、麦格理海脊、南极-太平洋海脊在内均为影响到 ACC 平均路径和弯曲的典型地形。地形阻塞的程度同时也影响到绕极流的涡动能, 经向海脊地形的下游将出现较多的涡旋。

6 总结与建议

本文以绕极流锋面分布、流速特征、纬向输运、经向输运及其响应的动力机制为重点, 对近些年来国内外学者的研究工作进行了总结和评述。总体来看, 基于调查数据的分布情况, 国内外学者对 ACC 的研究主要集中在德雷克海峡断面、非洲以南断面、以及塔斯马尼亚和新西兰以南断面。其中对德雷克海峡的研究最为丰富, 而且这也是通过锚碇观测数据开展 ACC 研究的唯一断面。

从采用数据的上看, 除了在德雷克海峡处有长期锚碇观测数据(包括水位、海流、CTD)外, 其他几条断面上尚有一些 CTD/XCTD/XBT 调查数据。在这几条断面以外的其他海域, 实测水文资料主要是 Argos 漂流浮标资料, 其他资料还包括卫星遥感资料和数值模拟结果。

通过数值模拟技术开展 ACC 研究也有很多, 部分研究结果不仅进一步验证了基于实测资料的研究结果, 在范围上包括了调查数据不能覆盖的

其他海域,在动力机制分析上也有大量积累。需要特别指出的是,由于本文主要是基于实测资料研究结果的进展总结,这些研究结果大多没有涉及。首先,Argos 漂流浮标资料和 ARGO 浮标资料难以构成完整的跨 ACC 断面;其次,受观测和数据传输技术的限制,这些资料特别是 ARGO 浮标资料在南极冰区和陆架浅水区几近空白;第三,虽然 Argos 漂流浮标资料在非冰区的积累相对丰富,但其仅限于表层;第四,作为一项相对较新的观测手段,ARGO 浮标资料积累相对较少。以上逐项制约了采用这些资料单独开展 ACC 准同步研究,而多进行较粗网格的平均季节状态分析,且单独采用 ARGO 浮标资料开展 ACC 的研究论文鲜有出现。

为了进一步加强对包括 ACC、南极区域海洋学的认识和知识积累,从而深入开展全球翻转环流的研究和极地对全球气候系统的影响研究,建议依托我国“南北极环境综合考察与评估”专项的深入实施,开展和加强以下几方面的工作。

1. 加强对包括罗斯海、威德尔海、南极关

键陆架陆坡海区的夏季站点观测和锚碇长期观测;

2. 酌情在澳大利亚/新西兰-南极之间、非洲-南极之间开展绕极流常规水文观测断面调查,进行 CTD 全深度观测和关键站位的锚碇长期观测;

3. 以 CTD 站位观测为基础,以锚碇长期观测和 Argos/ARGO 浮标观测为重点,辅以 XCTD/XBT 走航观测、以海豹为载体的 CTD 剖面观测,尽可能实现对重点海域和断面的全面资料获取;

4. 在南极冰区、冰架开展海-冰-气相互作用观测与研究,为数值模拟工作提供关键参数,为理论研究提供物质基础;

5. 在南大洋区域海洋模式上,在提高分辨率的前提下,增加海冰/冰山模块,并在通过实测资料验证的基础上,开展精细化数值模拟工作;

6. 以海洋动力学理论为基础,以数值模拟为基础手段,以实际观测结果为依据,深入开展南大洋动力机制研究,了解关键过程的控制因素与发生、发展机理。

参考文献

- 1 Deacon G. The Antarctic Circumpolar Ocean[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984: 180.
- 2 Whitworth III T. The Antarctic Circumpolar Current[J]. *Oceanus*, 1998, 31(2): 53—58.
- 3 Nowlin W D, Klinck J M. The physics of the Antarctic Circumpolar Current[J]. *Reviews of Geophysics*, 1986, 24(3): 469—491.
- 4 Orsi A H, Whitworth III T, Nowlin 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.
- 5 Rintoul S R, Sokolov S. Baroclinic transport variability of the Antarctic Circumpolar Current south of Australia (WOCE repeat section SR3)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C2): 2815—2832.
- 6 高郭平, 韩树宗, 董兆乾, 等. 南印度洋中国中山站至澳大利亚弗里曼特尔断面海洋锋位置及其年际变化[J]. *海洋学报*, 2003, 25(6): 9—19.
- 7 贺志刚, 董兆乾, 蒲书箴. 东南印度洋各锋位置和走向的季节变化及其与风场变化的关系[J]. *海洋学报*, 2007, 29(2): 18—24.
- 8 侍茂崇, 苗育田, 于洪华, 等. 南印度洋 110°E 夏季锋区特征及其变化规律[J]. *青岛海洋大学学报*, 1995, 25(增刊): 394—405.
- 9 苗育田, 于洪华, 许建平, 等. 斜航普里兹湾断面水温分布及温度锋特征[J]. *青岛海洋大学学报*, 1995, 25(增刊): 383—393.
- 10 于洪华, 苗育田, 侍茂崇. 南印度洋夏季锋的结构特征及其变化[C]//周秀骥, 陆龙骅. 南极与全球气候环境相互作用和影响的研究. 北京: 气象出版社, 1996: 159—168.
- 11 Sokolov S, Rintoul S. Multiple jets of the Antarctic Circumpolar Current south of Australia[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37(5): 1394—1412.
- 12 Gordon A L, Molinelli E, Baker T. Large-scale relative dynamic topography of the Southern Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(C6): 3023—3032.
- 13 Falco P, Zambianchi E. Near-surface structure of the Antarctic Circumpolar Current derived from world ocean circulation experiment

- drifter data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C5): C05003.
- 14 Olbers D, Borowski D, Völker C, et al. The dynamical balance, transport and circulation of the Antarctic Circumpolar Current[J]. *Antarctic Science*, 2004, 16(4): 439—470.
 - 15 Gille S T. Mean sea surface height of the Antarctic Circumpolar Current from Geosat data: method and application[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C9): 18255—18273.
 - 16 Klinck L, Nowlin W D. Southern Ocean-Antarctic Circumpolar Current[J]. *Encyclopedia of Oceanography*, 2001, doi:10.1006/rwos.2001.0370.
 - 17 Hofmann E E. The large-scale horizontal structure of the Antarctic Circumpolar Current from FGGE drifters[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1985, 90(C4): 7080—7097.
 - 18 Nowlin W D, Whitworth III T, Pillsbury R D. Structure and transport of the Antarctic Circumpolar Current at drake passage from short-term measurements[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1977, 7(6): 788—802.
 - 19 Gladyshev S V. Upper layer structure and variability of the Antarctic Circumpolar Current in the drake passage[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2014, 457(1): 877—881.
 - 20 Bryden H L, Pillsbury R D. Variability of deep flow in the drake passage from year-long current measurements[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1977, 7(6): 803—810.
 - 21 Fandry C, Pillsbury R D. On the estimation of absolute geostrophic volume transport applied to the Antarctic Circumpolar Current[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1979, 9(3): 449—455.
 - 22 Whitworth III T. Monitoring the transport of the Antarctic Circumpolar Current at drake passage[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1983, 13(11): 2045—2057.
 - 23 Whitworth III T, Peterson R G. Volume transport of the Antarctic Circumpolar Current from bottom pressure measurements[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1985, 15(6): 810—816.
 - 24 Reid J L, Nowlin W D. Transport of water through the drake passage[J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1971, 18(1): 51—64.
 - 25 Nowlin W D, Clifford M. The kinematic and thermohaline zonation of the Antarctic Circumpolar Current at drake passage[J]. *Journal of Marine Research*, 1982, 40(S): 481—507.
 - 26 Cunningham S A, Alderson S G, King B A, et al. Transport and variability of the Antarctic Circumpolar Current in drake passage[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C5): 8084.
 - 27 Chidichimo M P, Donohue K A, Watts D R, et al. Baroclinic transport time series of the Antarctic Circumpolar Current measured in drake passage[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44(7): 1829—1853.
 - 28 Georgi D T, Toole J M. The Antarctic Circumpolar Current and the oceanic heat and freshwater budgets[J]. *Journal of Marine Research*, 1982, 40: 183—197.
 - 29 Swart S, Speich S, Anson I J, et al. Transport and variability of the Antarctic Circumpolar Current south of Africa[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C9): C09014.
 - 30 Park Y H, Charriaud E, Craneguy P, et al. Fronts, transport, and Weddell gyre at 30°E between Africa and Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C2): 2857—2879.
 - 31 Knauss J A. *Introduction to Physical Oceanography*[M]. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1996: 152—156.
 - 32 Damerell G M, Heywood K J, Stevens D P. Direct observations of the Antarctic Circumpolar Current transport on the northern flank of the Kerguelen plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(3): 1333—1348.
 - 33 Gao L B, Yu W D, Wang H W, et al. Near-surface structure and energy characteristics of the Antarctic Circumpolar Current[J]. *Advances in Polar Science*, 2013, 24(4): 265—272.
 - 34 Reid R O, Elliott BA, Olson D B. Available potential energy: a clarification[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(1): 15—19.
 - 35 Han Y J, Lee S W. *A new analysis of monthly mean wind stress over the global ocean*[R]. Corvallis: Oregon State University, 1981: 148.
 - 36 de Szoeke R A, Levine M D. The advective flux of heat by mean geostrophic motions in the southern ocean[J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1981, 28(10): 1057—1085.
 - 37 Bryden H L, Heath R A. Energetic eddies at the northern edge of the Antarctic Circumpolar Current in the southwest Pacific[J]. *Pro-*

- gress in Oceanography, 1985, 14: 65—87.
- 38 史久新, 乐肯堂, 尹宝树, 等. 南极绕极流的经向输运[J]. 海洋科学集刊, 2003, 00: 10—20.
- 39 McDonagh E L, Bryden H L, King B A, et al. The circulation of the Indian Ocean at 32°S[J]. Progress in Oceanography, 2008, 79(1): 20—36.
- 40 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.
- 41 Klinck J M, Nowlin W D. Antarctic Circumpolar Current[M]//Steele J H, Turekian K K, Thorpe S A. Encyclopedia of Ocean Sciences. San Diego: Academic Press, 2001: 151—159.
- 42 Böning C W, Disper A, Visbeck M, et al. The response of the Antarctic Circumpolar Current to recent climate change[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(12): 864—869.
- 43 Thompson A F, Garabato A C N. Equilibration of the Antarctic Circumpolar Current by standing meanders[J]. Journal of Physical Oceanography, 2014, 44(7): 1811—1828.
- 44 杨小怡, 黄瑞新, 王佳, 等. 南极绕极流对风应力强迫的延时斜压响应[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(4): 501—507.
- 45 Wang Z, Kuhlbrodt T, Meredith M P. On the response of the Antarctic Circumpolar Current transport to climate change in coupled climate models[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(C8): C08011.
- 46 Wearn R B Jr, Baker D J Jr. Bottom pressure measurements across the Antarctic Circumpolar Current and their relation to the wind[J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1980, 27(11): 875—888.
- 47 Chelton D B, Bernal P A, McGowan J A. Large-scale interannual physical and biological interaction in the California current[J]. Journal of Marine Research, 1982, 40(4): 1095—1125.
- 48 Fu L L, Chelton D B. Temporal variability of the Antarctic Circumpolar Current observed from satellite altimetry[J]. Science, 1984, 226(4672): 343—346.
- 49 Peterson R G. On the transport of the Antarctic Circumpolar Current through drake passage and its relation to wind[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93(C11): 13993—14004.
- 50 Zambianchi E, Budillon G, Falco P, et al. Observations of the dynamics of the Antarctic Circumpolar Current in the Pacific sector of the Southern Ocean[M]//Spezie G, Manzella G M R. Oceanography of the Ross Sea Antarctica. Milan: Springer, 1999: 37—50.
- 51 Munk W H, Palmén E. Note on the dynamics of the Antarctic Circumpolar Current[J]. Tellus, 1951, 3(1): 53—55.

AN OVERVIEW OF ANTARCTIC CIRCUMPOLAR CURRENT RESEARCH

Chen Hongxia^{1,2}, Lin Lina^{1,2}, Pan Zengdi³

¹ First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;

² Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, SOA, Qingdao 266061, China;

³ East China Sea Branch, SOA, Shanghai 200137, China)

Abstract

The Antarctic Circumpolar Current (ACC) is a global circulation that flows from west to east around the lines of latitude, across the Pacific, Atlantic and Indian Oceans, and is the only current in the world that associates with all other ocean currents. Although the history of ACC observation and research is relatively short, great progress has been made in learning about the characteristics, change and mechanism of ACC. Research into its role in global change is becoming more intensive, and now represents a frontier in the field of ocean and atmosphere studies. A summary of ACC observations and theoretical research results over the

past few decades, including front distribution, flow characteristics, zonal transport, meridional transport, and their corresponding dynamic mechanisms, has allowed us to determine the weaknesses in our knowledge of the ACC. We make suggestions for related work, which forms the basis of our research into the ACC and related marine and atmospheric processes.

Key words the Antarctic Circumpolar Current, the Southern Ocean, global changes