

# 南大洋凯尔盖朗海台区的流场结构及季节变化

史久新<sup>1,2</sup>, 乐肯堂<sup>1</sup>, 崔秉昊<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 成均馆大学, 韩国 水原)

**摘要:** 利用冰-海耦合等密面模式模拟了南大洋凯尔盖朗海台区的环流及其季节变化. 对模拟结果的分析表明, 该海区的南极绕极流具有非常显著的条带状分布和非纬向性特征. 南极绕极流流经凯尔盖朗海台时, 在海台的南部、中部和北部表现出不同的形式, 其南部的一个分支贴近南极大陆, 与西向的陆坡流之间有强的相互作用. 海台以北的南极绕极流的变化以年周期为主, 海台以南的变化以半年周期为主, 其时间变化规律与这里的风应力的变化规律是一致的.

**关键词:** 环流; 季节变化; 南大洋

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2002)04-0011-12

## 1 引言

经过近些年的研究, 对于南极绕极流(ACC)的结构和动力学已有较多的了解. 但在印度洋扇形区(见图 1), ACC的最重要特征是非纬向性, 相关的研究尚待开展. 卫星高度计的实测结果显示, 沿着 ACC 的路径, 涡旋能量增强区往往位于地形剧变区, 特别是在 70°E 的凯尔盖朗海台区<sup>[1]</sup>. 这就表明, 印度洋扇形区是一个典型的高能涡旋区. 由于这种高能涡旋区能够把各种物质和能量作非纬向的输送, 从而对全球物质和能量的通量变化产生重要影响. 因此, 探讨这一高能涡旋区中 ACC 的非纬向特征及其变化, 对于全球气候变化研究具有重要意义.

位于南大洋印度洋扇形区中央的凯尔盖朗海台南北跨越了近 20 个纬距, 它的南北两端较高, 北面有高出海面的凯尔盖朗岛和赫德岛, 南面浅滩的最浅处为 184 m. 海台的中间有一个凹陷, 称为福恩海槽(Fawn Trough). 在凯尔盖朗海台与南极大陆之间是水深超过 3 000 m 的伊丽莎白公主海槽. 凯尔盖朗海台是 ACC 区中最突出的海底地形变化之一, 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<sup>[2,3]</sup>, 很早就受到了海洋学者的注意. Munk 和 Palmen 在 1951 年发表了有关 ACC 平衡机制的文章<sup>[4]</sup>. 通过计算分析, 他们指出平

收稿日期: 2001-04-12; 修订日期: 2001-07-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49876009).

作者简介: 史久新(1969-), 男, 山东省淄博市人, 副研究员, 博士, 从事海洋环流的研究.

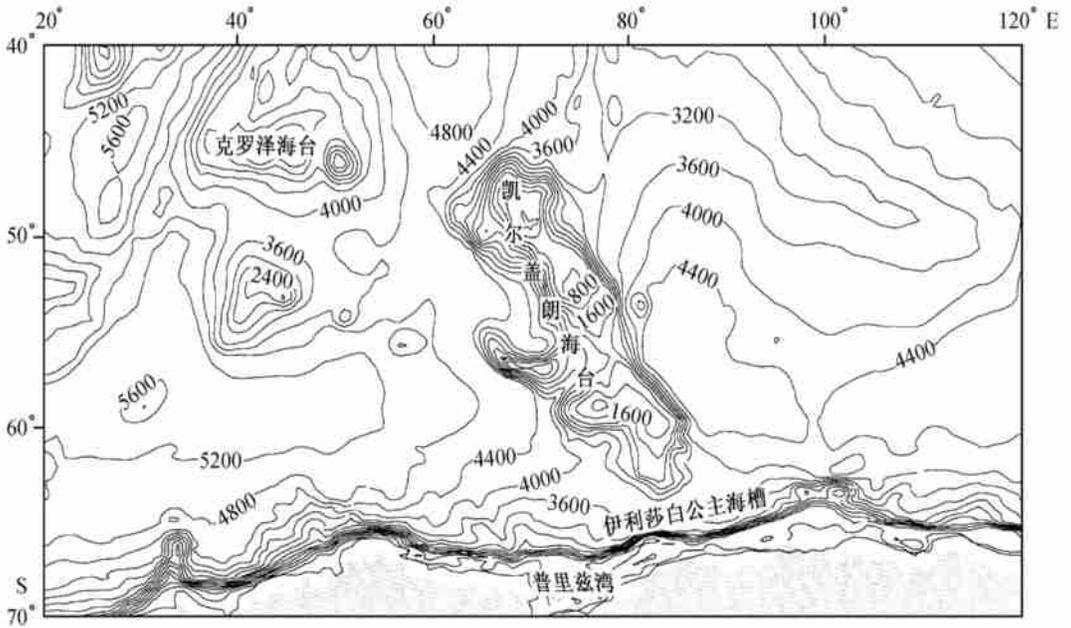


图 1 南大洋印度洋扇形区的地形 (单位:m)

衡西风输入的是海底形状应力,而凯尔盖朗海台正是必须考虑的海底地形之一. 近些年以来,印度洋的研究日益得到重视,有关南印度洋的研究也开展起来<sup>[5,6]</sup>,克罗泽(Crozet) - 凯尔盖朗海台成为研究的热点区域<sup>[7-9]</sup>. ACC与厄加勒斯回流(Agulhas Return Current, ARC)在这里汇合,这里既是亚热带流涡和ACC的交界处,也是亚热带水和亚南极水的过渡区. 由于克罗泽和凯尔盖朗两个海台的地形引导作用,克罗泽海盆中ACC的流核达到南大洋中最北端的位置<sup>[8]</sup>. 这里的流动具有急流(jet)的特征,被限制在宽度不到200 km的锋区内. Park等<sup>[8]</sup>的地转计算表明,约有75%的ACC从凯尔盖朗岛和阿姆斯特丹岛之间穿过,其余的部分则从凯尔盖朗岛以南通过. Sparrow等<sup>[6]</sup>利用新近出版的南大洋图集(HASO)<sup>[10]</sup>和FRAM(Fine Resolution Antarctic Model)的数值模拟结果,较为详细地研究了南印度洋的锋系和环流结构. 他们指出,在克罗泽海台以北,由于地形引导作用,厄加勒斯回流锋(Agulhas Return Front, ARF)、亚热带锋(Subtropical Front, STF)和亚南极锋(Subantarctic Front, SAF)汇合成一个单独的锋面,称为克罗泽锋. 这个锋面具有世界大洋中最大的温度和盐度梯度. 它在到达凯尔盖朗海台以北时可能又重新分化为3个锋面. 极锋(Polar Front, PF)在流经凯尔盖朗海台时分为两支,北面的一支在次表层,从凯尔盖朗岛以北通过,南面的一支则在表层从福恩海槽穿过,流量达 $65 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,其位置比PF的一般位置偏南约6个纬距. 在凯尔盖朗海台以西,这两个锋面的距离达到8个纬距. 经过海台后,南面的表层分支重新加入到北面的次表层分支中. 特别值得一提的是海区南部存在一个独立的锋面,它靠近南极大陆边缘并且从伊丽莎白公主海槽穿过,与之相随的锋面急流的流量达 $35 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Orsi等<sup>[11]</sup>将其称之为南ACC锋(Southern Antarctic Circumpolar Front, SAACF). 这个锋面使得ACC在该区域的南界达到 $67^\circ\text{S}$ ,几乎贴近普里兹湾口.

尽管南大洋印度洋扇形区的环流研究已取得相当的进展,但由于历史原因,相关的工作尚不够充分;而这一区域所具有的独特的海底地形又使得这里的ACC具有特殊的较强的非纬向

性特征, 相关的研究尚待开展. 本文将利用新的模拟结果分析凯尔盖朗海台区 ACC 的空间结构和季节变化, 并且着重对该海区 ACC 的非纬向性进行探讨.

## 2 数值模式

基于 OPYC 模式(又名 PIPE)<sup>[12]</sup>, 我们建立了一个冰-海耦合南大洋等密面模式. 模式的计算域与 FRAM 的区域相同, 覆盖了  $24^{\circ}\sim 79^{\circ}\text{S}$  之间的整个南大洋. 水深资料取自分辨率为  $5'$  的全球地形资料集(美国海洋大气局, NOAA), 水深大于  $6\,000\text{ m}$  的区域固定为  $6\,000\text{ m}$  深. 模式水平方向的网格数为  $422\times 172$ . 为了更细致地刻画所关心区域的地形, 采用变网格距技术, 在印度洋区段和南极近岸区域进行网格加密. 计算域中的最大网格为  $1^{\circ}$ (经度) $\times 0.5^{\circ}$ (纬度),  $y$  方向以南极近岸海区为中心,  $x$  方向以凯尔盖朗海台为中心进行网格加密, 使得最小网格为  $0.4^{\circ}$ (经度) $\times 0.15^{\circ}$ (纬度). 这里的网格间距是基于样条函数逐渐变化的, 这种缓变网格可以有效地抑制由于网格间距改变而造成的计算不稳定. 模式在垂向分为 11 层, 其中第 2~11 层的位势密度依次设定为  $1\,025.414$ ,  $1\,025.966$ ,  $1\,026.428$ ,  $1\,026.810$ ,  $1\,027.119$ ,  $1\,027.366$ ,  $1\,027.559$ ,  $1\,027.706$ ,  $1\,027.814$ ,  $1\,027.892$ . 模式的最上面一层为混合层, 其密度不是常数, 而由模拟的温盐值确定.

模式中还耦合了一个包含有积雪过程的海冰模式, 海面的热通量和淡水通量均不采取由 SST 或 SSS 反推的方法, 而根据实测气象资料计算. 大气强迫场资料取自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析资料集, 降水资料取自 Legates 和 Willmott<sup>[13]</sup>的结果. 模式的东东西水边界取为循环边界, 北部的水边界( $24^{\circ}\text{S}$ )取为封闭边界.

为了提高计算效率同时又满足足够长时间的模式启动之需, 我们先利用一个低分辨率的模式( $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ )进行了 40 a 的模拟, 然后将计算所得的所有变量内插到高分辨率模式中, 启动高分辨率模式再继续进行 5 a 的模拟, 将最后一年的结果输出用于分析研究.

本次模拟得到的通过德雷克海峡的体积输运的年平均值为  $145.3\times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ , 与基于  $z$  坐标的 FRAM 模式结果( $200\times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ )相比, 本次模拟的结果与实测结果( $134\times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ )<sup>[14]</sup>更加接近. 模拟的南大洋海冰总面积的年平均值为  $11.7\times 10^6\text{ km}^2$ , 其最小值出现在 3 月, 为  $6.4\times 10^6\text{ km}^2$ , 最大值出现在 9 月, 为  $15.5\times 10^6\text{ km}^2$ . 这个结果与 Zwally 等<sup>[15]</sup>的结果(夏季为  $4\times 10^6\text{ km}^2$ , 冬季为  $20\times 10^6\text{ km}^2$ )相符, 与我国学者根据 1973~1993 年的卫星资料得到的新的结果(夏季为  $2.3\times 10^6\text{ km}^2$ , 冬季为  $15\times 10^6\text{ km}^2$ )<sup>[16]</sup>更为接近. 因此, 本次模拟的 ACC 的流量以及海冰的结果是非常接近实际的. 另外, 环流和海冰的空间分布特征也与以往的研究相符<sup>[17]</sup>.

在印度洋扇形区, 目前尚无较系统的直接测流资料能够满足验证所需. 我们将本次模拟结果与以往的通过位势高度计算、卫星遥感以及数值模拟所取得的结果<sup>[5, 6, 17, 18]</sup>进行了比较(详见下一节), 分析结果表明本次模拟得到的凯尔盖朗海台附近的流场与以往的研究结果基本一致, 说明模拟是成功的.

## 3 南极绕极流的空间结构

首先来看一下该区域环流的基本情况. 从年平均表层流场(见图 2)可以看到, 在凯尔盖朗海台区, ACC 的流幅达到最宽, 向北延伸至  $40^{\circ}\text{S}$ , 其南边界则贴近南极海岸. ACC 由大西洋进

入印度洋时基本上沿纬向运动,但在进入印度洋扇形区以后发生了很大的变化,实际上这种变化在到达凯尔盖朗海台之前就开始了.流经海台北部的 ACC 先急剧地转向北,然后再转向东南,最后才恢复纬向特征.南部的情况则要复杂一些,一部分 ACC 继续向东,最南面的 ACC 则转向南,一部分加入了威德尔流涡,另一部分则一直向南直到接近南极海岸,再通过伊利莎白公主海槽,从南面绕过凯尔盖朗海台后,先沿海台的东边向北流,继而折向东流.另外,有一部分 ACC 穿过了海台中间的福恩海槽.上述特征基本上与以往的地转计算结果<sup>[6, 17, 18]</sup>、卫星遥感结果<sup>[5]</sup>和数值模拟结果<sup>[6]</sup>一致.

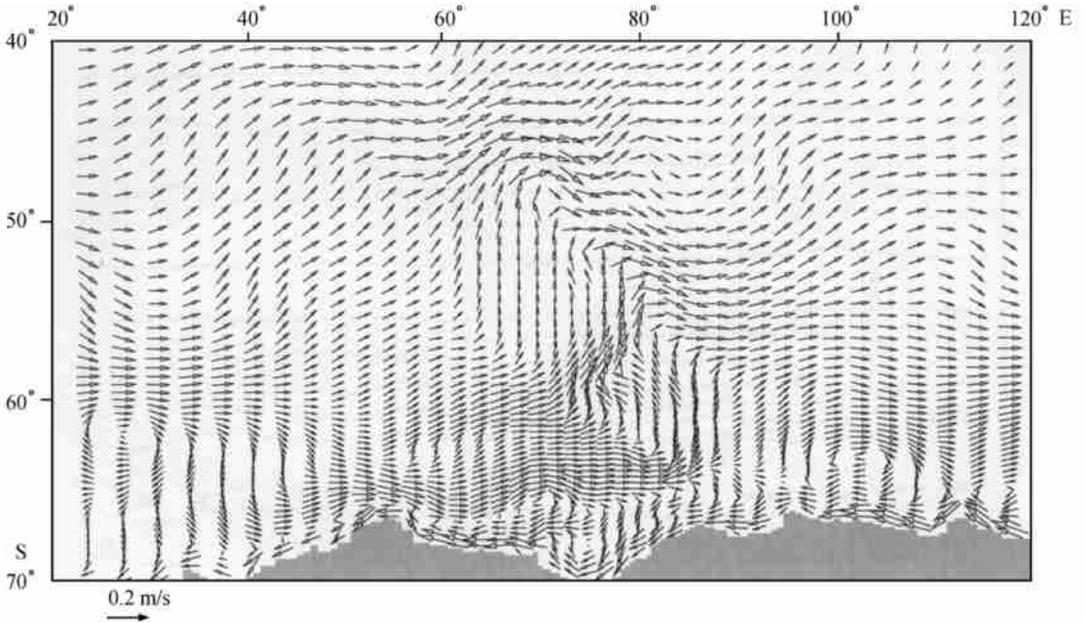


图2 年平均表层流场  
(为清晰计,在  $x$  方向每 4 个网格画一个流矢)

### 3.1 不同经度上的变化

利用新的南大洋水文图集<sup>[10]</sup>和 FRAM 的结果, Sparrow 等<sup>[6]</sup>较为系统地研究了南印度洋的锋面和环流结构.他们指出,该区域的 ACC 是由多支锋面急流组成的,呈现出鲜明的条带状分布特征.这里的 ACC 中包含了 ARF, STF, SAF, PF 以及 SAACF 等锋面,在这些锋面附近伴随有急流,在不同的经度上有不同的结构.我们研究了  $20^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{E}$  之间每隔  $10^{\circ}$  断面上的速度  $u$  分量(向东为正)及流量的变化,重点讨论了凯尔盖朗海台区不同经度上锋面急流的分布特征,并与 Sparrow 等<sup>[6]</sup>的结果进行比较.我们通过比较发现,虽然 ACC 的强度有较显著的季节变化,但其锋面急流的结构形式并没有明显的季节变化(见下节的讨论).为了节省篇幅,我们这里仅给出夏季的图例.不过在讨论中,为了与他人的结果比较,当涉及到流量时,我们采用年平均值.

$20^{\circ} \text{E}$  断面代表的是大西洋和印度洋分界处附近的情况.该断面上的流动以  $62^{\circ} \text{S}$  为界分为两个区域.南部是威德尔流涡,北部是 ACC 区.在 ACC 区有两个高速区,南面的一个流量为  $38 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,北面的一个包含了两个小的流核,总流量达  $155 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ .  $30^{\circ} \text{E}$  断面位于非洲和南极之间,计算得到通过该断面的净流量为  $145 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,较 FRAM 的结果( $185 \times$

$10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 和 HASO 的地转计算结果 ( $244 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 要小。  $30^\circ \text{ E}$  断面上有 3 支东向的急流,  $60^\circ \text{ S}$  附近的一支流量达  $83 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 其位置比 HASO 的结果偏南约  $6^\circ$ 。北面两支的流量总计为  $122 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 一支以  $52^\circ \text{ S}$  为中心, 另一支以  $42^\circ \text{ S}$  为中心。后者比前者强且贯穿深度大, 这与 HASO 的结果相同, 但在 FRAM 的结果中, 这两支流动是汇合在一起的。对于非洲以南的环流结构问题, 以往研究给出的结果不尽相同<sup>[11, 19]</sup>。在 HASO 的结果中,  $30^\circ \text{ E}$  断面上已经出现了伴随 SACCF 的急流, 而在 FRAM 中却没有 SACCF 的迹象。从我们的结果看,  $65^\circ \text{ S}$  以南存在一支东向流动, 但在其北侧还有一支西向流, 这种结构与  $20^\circ \text{ E}$  断面上威德尔流的结构形式更接近。实际上, 威德尔流涡的东边界恰在  $30^\circ \text{ E}$  附近<sup>[11]</sup>, 这里的环流形式确实是比较复杂的。

从  $40^\circ \text{ E}$  断面(图 3a)上可以看到上述 3 支急流, 其位置和强度与  $30^\circ \text{ E}$  断面上的情况相似, 这个趋势与 HASO 和 FRAM 的结果相同。值得注意的是, 在  $65^\circ \text{ S}$  以南, 南极陆坡附近还有一支较强的东向流, 虽然它的流量只有  $3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 但其贯穿深度超过了 1000 m, 这正是 ACC 的特性, 表明它确实是从 ACC 中分离出来的。实际上, 它是伴随 SACCF 的急流, 是 ACC 最南的一个分支。这也说明 ACC 的南部分支

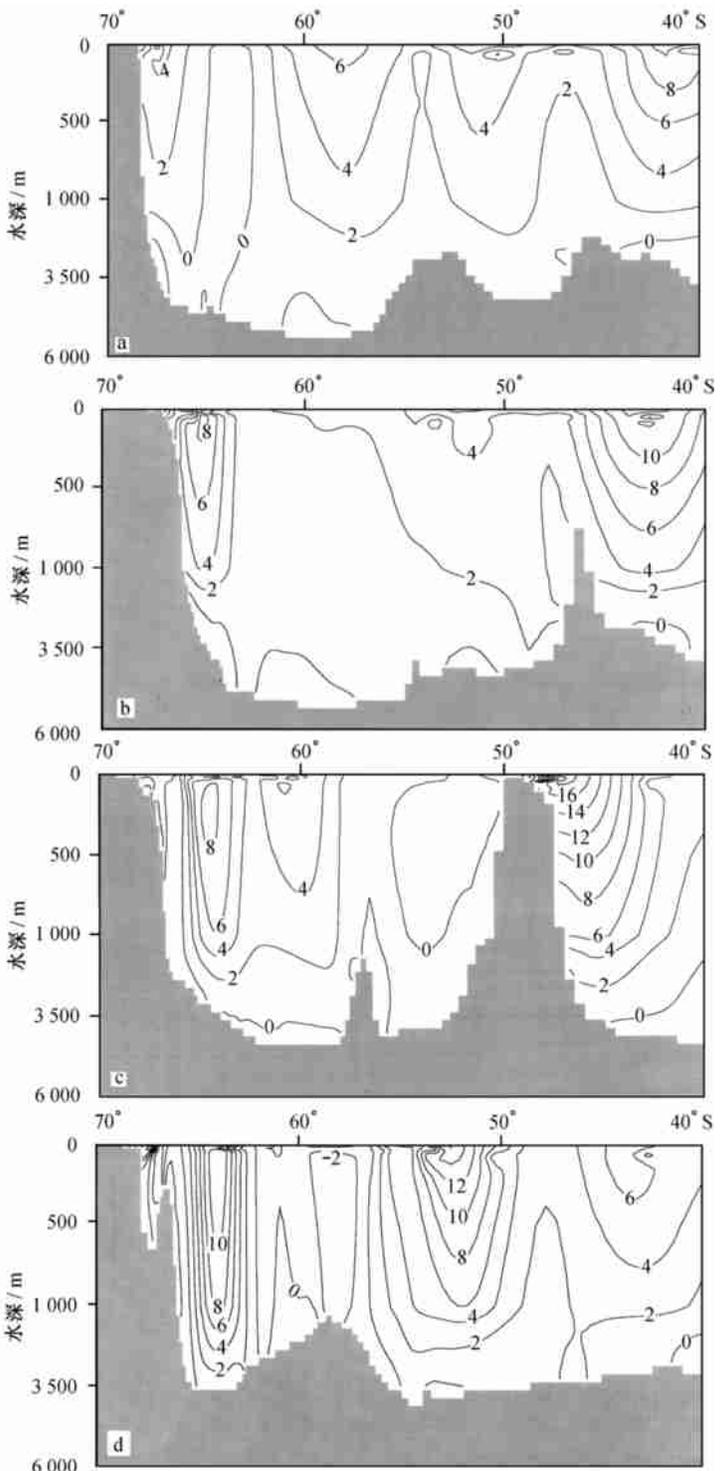


图3 夏季各断面的流速  $u$  分量分布(单位:  $\text{cm/s}$ )

a.  $40^\circ \text{ E}$  b.  $50^\circ \text{ E}$  c.  $70^\circ \text{ E}$  d.  $80^\circ \text{ E}$

早在  $40^{\circ}\text{E}$  就已经远离了 ACC 的主轴, 而贴近南极大陆.

从  $50^{\circ}\text{E}$  断面(见图 3b)上可以看到克罗泽海台对 ACC 的地形引导效应. 在克罗泽海台以北有一支特别强的东向流, 根据 Sparrow 等<sup>[6]</sup>的分析, 这支流动中包含了 SAF, STF 以及 ARF 等锋面附近的急流. 海台南侧的东向流强度较弱, 对照表层流场(见图 2)可以看出, 这里的 ACC 已经开始转向. 最南面的伴随 SACCF 的急流明显增强, 流量接近  $20 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . 该断面的急流结构与 HASO 的结果非常接近, 只是流的强度相对较弱. 在  $50^{\circ}\text{E}$  断面上, 克罗泽海台以北的东向流的总流量为  $76 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 表层最大流速为  $0.13 \text{ m/s}$ , 而 HASO 的结果分别为  $105 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $0.25 \text{ m/s}$ , FRAM 的结果分别为  $94 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $0.53 \text{ m/s}$ . 我们计算得到的  $30^{\circ}\text{S}$  以南的总流量为  $167 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 而 HASO 和 FRAM 的结果分别为  $190 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $220 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$60^{\circ}\text{E}$  断面大致位于克罗泽海台和凯尔盖朗海台中间. 最强的流动位于  $40^{\circ}\text{S}$  和  $50^{\circ}\text{S}$  之间, 其位置与 HASO 的结果( $39^{\circ} \sim 47^{\circ}\text{S}$ )接近. Park 等<sup>[8]</sup>实测的结果是  $60^{\circ}\text{E}$  断面上最强的锋面位于  $43.7^{\circ} \sim 45.3^{\circ}\text{S}$ . FRAM 的结果中, ACC 的主流位于  $37^{\circ} \sim 44^{\circ}\text{S}$ . 我们计算的伴随 PF 的急流在  $60^{\circ}\text{S}$  以南, 流量为  $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 其位置仍较 HASO 的结果偏南; 而伴随 SACCF 的流量达到  $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 大于 FRAM 的结果( $19 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 而与 HASO 的结果( $35 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ )接近, 且其中心位置在  $64.8^{\circ}\text{S}$ , 与 HASO 的结果( $64.2^{\circ}\text{S}$ )非常接近.

为了研究凯尔盖朗海台对 ACC 的影响, 我们来考察  $70^{\circ}\text{E}$  断面上流速  $u$  分量的分布[该断面紧邻凯尔盖朗岛( $48^{\circ}15'\text{S}$ ,  $69^{\circ}10'\text{E}$ )]. 从图 3c 可以看到, 由于凯尔盖朗海台的引导作用, 海台北面的流速显著增大, 表层最大流速超过  $0.2 \text{ m/s}$ . 从凯尔盖朗岛以北通过的 ACC 的流量为  $108 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 岛南面的 ACC 的流量为  $75 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 即约有 60% 的 ACC 是从凯尔盖朗岛的北面通过的. 在 HASO 的结果中, 凯尔盖朗海台以北的最大表层流速为  $0.27 \text{ m/s}$ , 从凯尔盖朗岛北侧和南侧通过的 ACC 流量分别为  $122 \times 10^6$  和  $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . 在 FRAM 的结果中, 这两个流量分别为  $146 \times 10^6$  和  $67 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . 在这个断面上, 我们计算的伴随 SACCF 的流量为  $37 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 与 HASO 的结果( $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ )接近.

在  $80^{\circ}\text{E}$  断面(见图 3d)上可以看到凯尔盖朗海台南部的一个海山, 伴随 SACCF 的急流在海山南侧的伊利莎白公主海槽中, 这里的流动非常强且深达海底. 流量达  $37 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 大于 HASO 的结果( $20 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ). 伴随 PF 的急流在  $50^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{S}$  之间, 它又成为断面上最强的流动, 表层最大流速为  $0.15 \text{ m/s}$ , 流量为  $151 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ .  $90^{\circ}\text{E}$  断面上的 ACC 主要集中在  $40^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{S}$  之间.

高郭平等<sup>[18]</sup>利用中国和澳大利亚的调查资料计算了  $68^{\circ}\text{E}$ ,  $72^{\circ}\text{E}$ ,  $73^{\circ}\text{E}$  和  $78^{\circ}\text{E}$  断面的地转流结构. 其结果显示, 在  $62^{\circ} \sim 63^{\circ}\text{S}$  有一个较强的高速流区. 在我们的模拟结果中,  $70^{\circ}\text{E}$  断面上的  $60^{\circ} \sim 65^{\circ}\text{S}$  之间有两个高速流区, 且南边的一个较强. FRAM 的结果与我们的结果类似, 而 HASO 的结果则显示  $60^{\circ} \sim 65^{\circ}\text{S}$  之间存在一个高速流区, 其核心在  $64^{\circ}\text{S}$  附近. 我们认为,  $70^{\circ}\text{E}$  附近, 在  $60^{\circ} \sim 65^{\circ}\text{S}$  之间确有一个高速流区, 它实际上是 ACC 的最南的一个分支, 即伴随 SACCF 的锋面急流. 在不同年份, 这支急流的位置会有南北的摆动, 有时也可能分为南北两支, 但就多年平均而言, 其流核是偏南的.

### 3.2 非纬向性

ACC 以东向的流动为主, 但在某些地点也具有非纬向的成分, 在流场矢量图(见图 2)上可以看出这一特性. 在印度洋扇形区, 较强的非纬向运动主要集中在凯尔盖朗海台附近. 在凯尔盖朗

海台的中部和东南侧存在强的北向流动分量, 在整个南大洋中其强度仅次于德雷克海峡的北向运动分量. 在海台的东北侧是偏南向的流动, 这个区域是 ACC 从北面绕过海台以后转向东南时形成的. 另外一个具有较大南向分量的区域是大西洋-印度洋海盆, 如前所述, 在这个位置上, 伴随 SACCF 的急流从 ACC 中分离出来. 为了更细致地研究该区域 ACC 的非纬向性特征, 我们给出了夏季  $45^{\circ}\text{S}$ ,  $47^{\circ}\text{S}$ ,  $55^{\circ}\text{S}$  和  $60^{\circ}\text{S}$  共 4 个断面的速度  $v$  分量(向北为正)的剖面图(图 4).

$45^{\circ}\text{S}$  断面恰位于克罗泽-凯尔盖朗海台的北侧, 如前所述, ACC 的主要部分是从海台的北面通过的. 从图上看, 这里的 ACC 具有较大的经向分量, 而且在  $40^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$  之间表现为正负相间排列的形式, 这表明这里的 ACC 的流动有明显的间隔性的南北偏转, 即流轴存在南北的摆动. 在  $20^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  之间, 该断面上南、北方向的流量大体相当.  $47^{\circ}\text{S}$  断面上凯尔盖朗海台(约  $70^{\circ}\text{E}$ ) 西侧为偏北的流动, 东侧为偏南的流动, 通过断面的流量分别为  $28 \times 10^6$  和  $42 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 而且东侧的南向流速明显大于西侧的北向流速. 在  $50^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$  之间, 该断面的流速  $v$  分量也是正负相间的.  $55^{\circ}\text{S}$  断面经过凯尔盖朗海台中部的福恩海槽, 海槽中( $70^{\circ}$

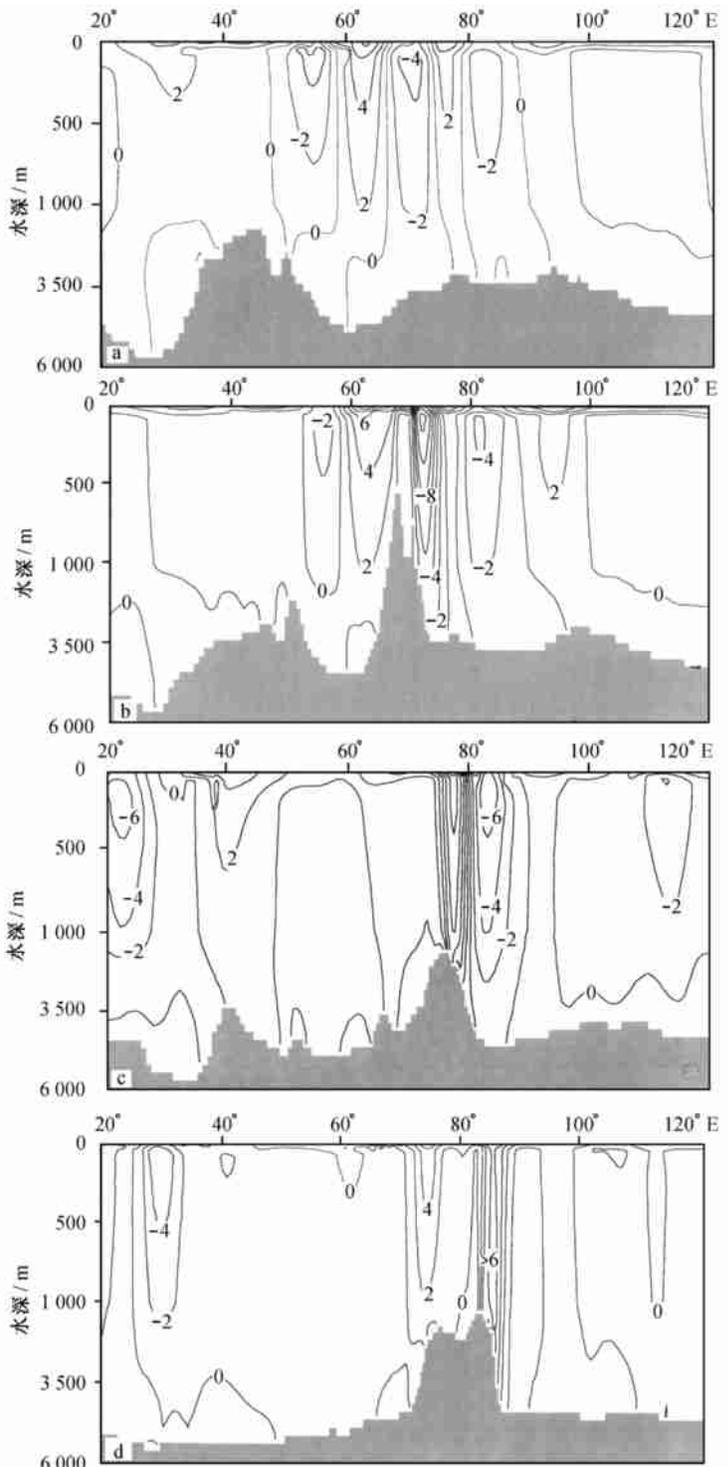


图 4 夏季各断面的流速  $v$  分量分布(单位:  $\text{cm/s}$ )

a.  $45^{\circ}\text{S}$  b.  $47^{\circ}\text{S}$  c.  $55^{\circ}\text{S}$  d.  $60^{\circ}\text{S}$

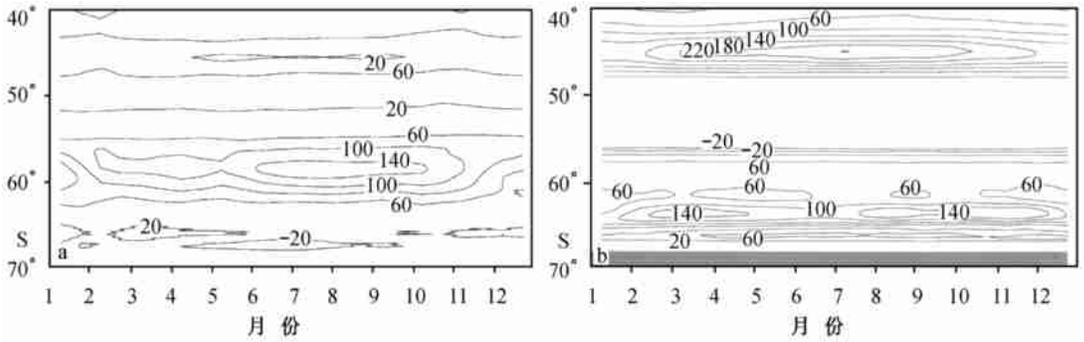
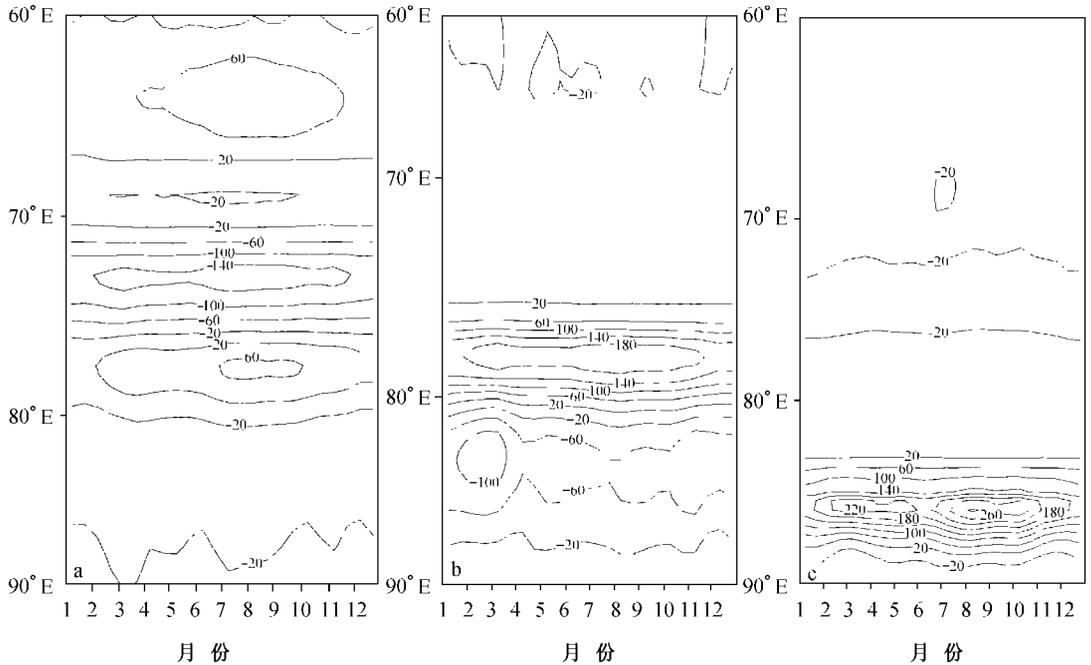
~ 80°E) 有一支北向的流动, 其表层最大速度为 0.18 m/s, 经向流量达  $41 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 比 60°E 断面上伴随 PF 的流量 ( $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 还要大. 20°E 附近的流动有较大的南向分量, 说明 ACC 的一部分在这个纬度上开始向南偏转. 通过 55°S 断面的总的经向流量为  $80 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 方向向南. 60°S 断面与凯尔盖朗海台的南部相交, 海台附近的流都是偏向北的, 但是有两个极大值中心. 实际上, 西部的一个 (75°E) 对应的流动是在海台上方, 而东部较强的流动则在海台的东侧, 也就是经过伊丽莎白公主海槽绕过海台转向北的那部分流动, 其流量为  $36 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 与伊丽莎白公主海槽中伴随 SACCF 的流量相当. 60°S 断面的总经向流量为  $44 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 方向为北向.

根据以上的分析, 再结合流场图(见图 2), 我们可以看到 ACC 在经过凯尔盖朗海台时受到海台的阻挡, 流态发生了很大的改变, 即纬向特征减弱, 非纬向特征增强. 具体可分为如下 3 种情况: (1) 流经海台北部的 ACC 在海台西侧转向北, 绕过海台后又转向南, 即在海台西侧为偏北方向, 在海台东侧为偏南方向(以 47°S 断面为代表); (2) 有部分 ACC 从海台中部的福恩海槽通过, 海槽东部中的流动实际上是北偏东方向的, 这部分流动出了海槽以后先向北然后再转向南(以 55°S 断面为代表); (3) 南部的 ACC 先是转向南, 大部分通过伊丽莎白公主海槽并绕过海台后再急剧转向北; 而其余的小部分则流过海台南部后也转向北(以 60°S 断面为代表). 这样, 在海台的南部, 西侧的流动基本上是东向的, 东侧则是偏北或者北向的流. 各个纬度上的经向流动有一个共同的特征, 即海台东部的经向流动分量大于西部, 也就是说海台东部的 ACC 具有更显著的非纬向特征.

## 4 南极绕极流的季节变化

首先我们来看 ACC 锋面急流分布的季节变化. 我们研究了各个经向断面的纬向体积输运的时间变化图(又称 Hovmueller 图, 图 5 给出了几个代表性的断面). 为了便于以后与其他结果比较, 我们采用了单位宽度上的平均值, 这个量实际上就是速度的垂向积分. 从图中可以看出, 各个季节的 ACC 均表现出条带状分布特征, 其结构形式的变化不大, 但其强度随时间有较显著的变化. 在 20°E 断面上, ACC 中有两个急流区. 北部的急流区以 50°S 为中心, 在 6~11 月份有所加强; 南部的急流区较北部的弱, 且在夏季有所减弱. 30°E 断面上, 最大的东向体积输运在 60°S 附近, 从秋季至春季在它的北面出现另外一个急流区. 40°断面(见图 5a)上, 最强的纬向体积输运仍在 60°S 附近, 表现出冬季强、夏季弱的变化趋势. 50°E 断面上 ACC 区的纬向体积输运随时间有较大的变化, 但是其变化似乎并没有一定的规律可循. 60°E 断面上纬向体积输运的高值区有两个, 北面的一个以 45°S 为中心, 有明显的冬强夏弱的年变化周期, 南面的一个范围较小, 在 65°S 附近, 它在夏季和冬季较弱, 而在另外的季节有所加强, 似乎有半年的变化周期. 70°E 断面(见图 5b)和 80°E 断面的情况与 60°E 断面相似, 即 45°S 附近的高值区表现出冬强夏弱的年周期变化, 而 65°S 附近的高值区则是半年周期的变化, 不过在 80°E 断面的 50°~55°S 之间又出现一个高值区, 它的季节变化不显著. 另外, 70°E 断面上 45°S 附近的高值区特别强, 在 7 月甚至超过了  $240 \text{ m}^2/\text{s}$ . 如前所述, ACC 在这里从北面绕过了凯尔盖朗海台. 而在 80°E 断面上, 最大的东向体积输运则出现在 65°S 附近, 即凯尔盖朗海台以南. 90°E 断面东向体积输运的高值区在 55°S 附近, 没有明显的季节变化规律.

为了研究 ACC 非纬向特征的时间变化, 我们给出了各个断面的经向体积输运时间变化图(见图 6), 基于上一节的分析, 我们这里只给出 47°S, 55°S 和 60°S 几个具有代表性的断面. 总

图5 各断面纬向体积运输的年变化(单位:  $\text{m}^2/\text{s}$ )a.  $40^\circ\text{E}$  b.  $70^\circ\text{E}$ 图6 各断面经向体积运输的年变化(单位:  $\text{m}^2/\text{s}$ )a.  $47^\circ\text{S}$  b.  $55^\circ\text{S}$  c.  $60^\circ\text{S}$ 

地看来, 1年中经向体积运输的变化是比较明显的, 不过南向和北向的运输区基本上是固定不变的, 只是量值上有所改变。  $47^\circ\text{S}$  断面上,  $60^\circ\sim 80^\circ\text{E}$  之间, 1年中的各个时期均表现为南向与北向体积运输交错排列的形式, 且都有冬强夏弱的变化趋势。  $55^\circ\text{S}$  断面上,  $80^\circ\text{E}$  以西的北向运输高值区表现出冬强夏弱的年周期变化,  $80^\circ\text{E}$  以东的南向体积运输的半年周期变化则更显著一些。  $60^\circ\text{S}$  断面上, 凯尔盖朗海台以东( $80^\circ\sim 90^\circ\text{E}$ ) 的强的北向体积运输明显具有半年的变化周期, 这一变化趋势与  $70^\circ\text{E}$  断面上  $65^\circ\text{S}$  附近的东向体积运输的变化规律是一致的, 实际上它们对应的也是同一支流动。

ACC 表现出的年周期的变化是容易理解的, 因为在南半球无论是风应力, 还是密度梯度都有着显著的冬强夏弱的周期变化, 其根本原因在于太阳辐射的年周期变化. 至于半年周期, 以往的研究表明它也是南半球大气- 海洋系统具有的变化规律. 在有关大气和海冰等资料的分析研究中(如文献[20])都曾报道过这个半年的周期. 在  $70^{\circ}\text{E}$  断面的实测风应力年变化图(图 7b)中,  $40^{\circ} \sim 50^{\circ}\text{S}$  之间的风应力表现出年周期变化, 最大值出现在 8 月. 但是, 在  $50^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{S}$ , 1 年中风应力有两个极大值出现, 一个是在 8 和 9 月之间, 另一个出现在 4 月, 其中前者明显强于后者. 我们认

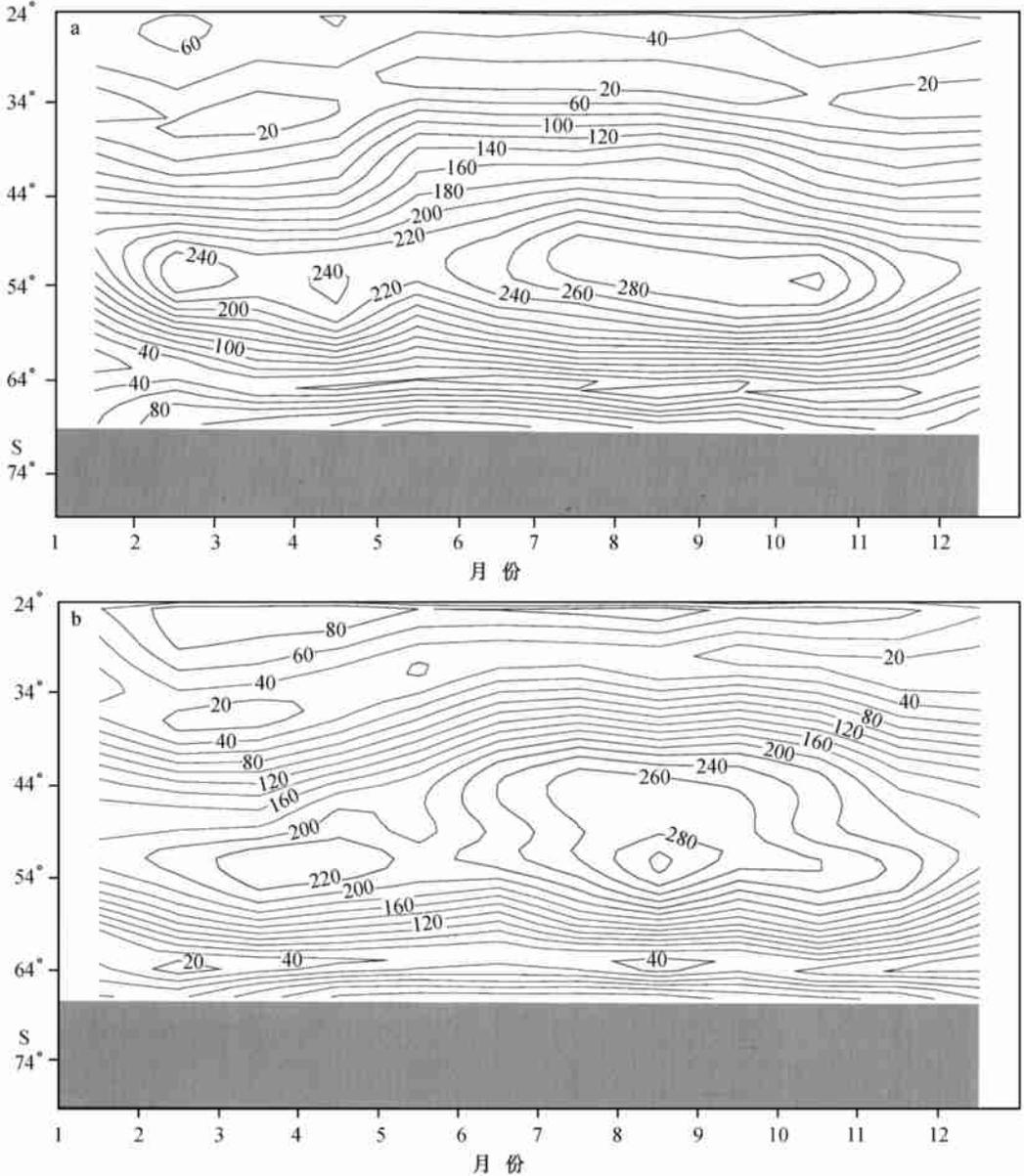


图 7 各断面风应力的年变化(单位:  $\times 10^{-3} \text{ N/m}^2$ )

a.  $40^{\circ}\text{E}$  b.  $70^{\circ}\text{E}$

为, 这个变化规律可能是一个年周期(极大值在冬季)和一个半年周期(1 年中有两个极大值, 分别在秋季和春季)的叠加。在上面分析的环流场中, 该断面的纬向体积输运在  $45^{\circ}\text{S}$  附近为年周期变化, 在  $65^{\circ}\text{S}$  附近为半年周期变化, 这与风应力的变化基本一致。我们再来看一下  $40^{\circ}\text{E}$  断面的纬向体积输运, 它在 4 月也有一个极大值出现, 其时间变化实际上也包括了 1 年和半年两个周期的组合, 这与该断面上风应力的变化规律是一致的(见图 7a)。由此看来, 模拟的 ACC 所表现出的年周期和半年周期的变化与实测风应力的变化规律一致, 这两个周期都是 ACC 所具有的变化周期。

## 5 结论与讨论

(1) ACC 在印度洋扇形区具有明显的条带状分布特征, 它是由多个锋面急流组成的。在不同的经度上, 急流核的个数和结构是不同的。在克罗泽-凯尔盖朗海台区以外, 最强的流动在 PF 附近, 但在海台区, 最强的流动则位于海台的北侧, 这里是多支锋面(如 ARF, STF 和 SAF)急流汇合的地方。

(2) 该扇形区的  $40^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$  存在伴随 SACCF 的东向流动, 它实际上是 ACC 的最南部的一个分支, 这支流动在  $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{E}$  之间转向南, 然后在南极陆坡以北继续向东流, 穿过伊丽莎白公主海槽后再转向北重新加入到 ACC 的主流中。实际上, 伴随 SACCF 的东向流与西向的陆坡流在空间上非常接近, 它们之间的相互作用构成了印度洋扇形区 ACC 与沿岸流相互作用的主要部分。

(3) 凯尔盖朗海台区 ACC 的非纬向性特征非常显著, 而且在海台的北部、中部和南部又有不同的表现形式。在北部, 海台西侧为偏北向流动, 东侧为偏南向流动; 南部的情形则恰好相反, 即西侧的流动偏南而东侧的流动偏北。但无论南部还是北部, 海台东侧 ACC 的非纬向性均比西侧的显著。

(4) ACC 的纬向和经向体积输运既有年周期变化也有半年周期的变化, 在凯尔盖朗海台区, 海台以北的 ACC 的变化以年周期为主, 海台以南的变化以半年周期为主。这与该海区风应力的变化规律一致。

(5) 毋庸置疑, 凯尔盖朗海台的存在, 亦即海台周围的地形变化是 ACC 在该区表现出强的非纬向性特征的主要原因。以往的研究多利用位涡度守恒定理(均质流体<sup>[3,21]</sup>或非均质流体<sup>[22]</sup>)来讨论海台对 ACC 的影响。实际上, 大部分 ACC 在遇到凯尔盖朗海台之前就开始转向和分叉了, 其南部的分支表现尤为明显。因此, 要全面研究这一问题, 还应考虑其他因素, 特别是风应力的作用。

### 参考文献:

- [1] MORROW R, CHURCH J, COLEMAN R, et al. Eddy momentum flux and its contribution to the Southern Ocean momentum balance [J]. *Nature*, 1992, 357: 482-484.
- [2] WEBB D J. A simple model of the effect of the Kerguelan Plateau on the strength of the ACC [J]. *Geophys Astrophys Fluid Dyn*, 1994, 70: 57-84.
- [3] 孙 澈, 侍小兵, 高郭平. 印度洋底形阻力对绕极流的影响——克尔盖朗-高斯伯格海台对环流影响的数值计算[J]. *青岛海洋大学学报*, 1995, 25: 312-325.
- [4] MUNK W H, PALMEN E. Note on the dynamics of the Antarctic Circumpolar Current [J]. *Tellus*, 1951, 3: 53-55.
- [5] PARK Y-H, GAMBERONI L. Large-scale circulation and its variability in the south Indian Ocean from TOPEX/POSEIDON altimetry [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100(C12): 24 911-24 929.
- [6] SPARROW M D, HEYWOOD K J, BROWN J, et al. Current structure of the south Indian Ocean [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101(C3): 6 377-6 391.

- [7] STRAMMA L. The south Indian Ocean current [J]. *J Phys Oceanogr*, 1992, 22(4): 421—430.
- [8] PARK Y-H, GAMBERONI L, CHARRIAUE. Frontal structure, water masses, and circulation in the Crozet Basin [J]. *J Geophys Res*, 1993, 98(C7): 12 361—12 385.
- [9] MATANO R P, SIM IONNATO C G, STRU B P T. Modeling the wind-driven variability of the south Indian Ocean [J]. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29(2): 217—230.
- [10] OLBERS D, GOURETSKI V, SEIB G, et al. Hydrographic Atlas of the Southern Ocean [Z]. Alfred Wegener Inst. For Polar and Mar. Res., Bremerhaven, Germany, 1992. 82.
- [11] ORSI A H, WHIT WORTH III T, NOWLIN W D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current [J]. *Deep Sea Res*, Part I, 1995, 42(5): 641—673.
- [12] OBERHUBER J M. Description of the parallel isopycnal primitive equation OGCM. DKRZ Report, No. 19 [R]. Hamburg, Germany, 1999. 158.
- [13] LEGATES D R, WILLMOTT C J. Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected global precipitation [J]. *Internat J Climatol*, 1990, 9: 111—127.
- [14] NOWLIN W D, KLINCK J M. The physics of the Antarctic Circumpolar Current [J]. *Rev Geophys and Space Phys*, 1986, 24: 469—491.
- [15] ZWALLY H J, COMISO J C, PARKINSON C L, et al. Antarctic sea ice 1973—1976: satellite passive-microwave observations [B]. NASA Sci and Tech Inf Rep, SP-459 [R]. 1983. 206.
- [16] 邹斌, 解思梅, 郝春江. 南极海冰变化特征的研究 [A]. 南极与全球气候环境相互作用和影响的研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1996. 370—377.
- [17] GORDON A L, MOLINELLI E, BAKER T. Large-scale relative dynamic topography of the Southern Ocean [J]. *J Geophys Res*, 1978, 83: 3 023—3 032.
- [18] 高郭平, 侍小兵, 刘齐. 普里兹湾附近海域流场分析 [J]. 青岛海洋大学学报, 1995, 25: 359—365.
- [19] BELKIN I M, GORDON A L. Southern Ocean fronts from the Greenwich Meridian to Tasmania [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101(C2): 3 675—3 680.
- [20] 祈立新, 彭公炳. 南极海冰面积变化的统计分析 [A]. 南极与全球气候环境相互作用和影响的研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1996. 267—271.
- [21] JOHNSON J A, HILL R B. A three-dimensional model of the Southern Ocean with bottom topography [J]. *Deep Sea Res*, 1975, 22: 745—751.
- [22] MARSHALL D. Topographic steering of the Antarctic Circumpolar Current [J]. *J Phys Oceanogr*, 1995, 25(7): 1 636—1 650.

## The pattern and seasonal variation of the circulation in the region of the Kerguelen Plateau

SHI Jit-xin<sup>1,2</sup>, LE Ken-tang<sup>1</sup>, CHOI Byungho<sup>3</sup>

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 2. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 3. *Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea*)

**Abstract:** A coupled sea ice–ocean isopycnal numerical model of the Southern Ocean is established to study the circulation and its seasonal variation in the region of the Kerguelen Plateau. An analysis of the simulated results shows significant banded structure and non-zonal characteristics of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) in this region. There exist different circulation patterns as the ACC meets the plateau. The southern branch of the ACC is very near to the Antarctic coast and displays its strong interaction with the westward Antarctic Slope Current. The northern branch of the ACC behaves like an annual variation while the southern one displays a semi-annual variation. The variation phases of both branches are consistent with those of the wind stress in this region.

**Key words:** circulation; seasonal variability; Southern Ocean