

普里兹湾及其邻近海区冰-海相互作用的 数值研究 II. 环流*

史久新 乐肯堂 于康玲

(中国科学院海洋研究所)

对于普里兹湾海区的环流,特别是深层环流,迄今为止知之甚少。虽有一些直接测流资料,但极为零星,难以深入分析。而早期的研究大多是基于动力高度的计算结果,只是近些年来,利用卫星遥感资料和漂移浮标资料,才使该区的环流研究工作取得了进展。Grigor'yev(1967)基于动力高度计算,最早给出了普里兹湾水平环流的基本图像。Smith等(1984)和 Middleton等(1989)根据澳大利亚在 BIOMASS 计划期间取得的资料,给出了较新的表层动力高度分布,乐肯堂等(1997)根据中国南极考察资料,也获得了本区的地转流场。在 WOCE 计划中,普里兹湾海区附近设有 S2(60°E),S3(90°E),S10(60°S)三条断面,通过对这些 WOCE 资料的分析和研究,对该海区的环流有了进一步的了解。在南大洋可以通过研究卫星图片上浮冰或冰山的运动来了解表层流场的情况(Tchernia, *et al.*, 1980),也可以在浮冰或冰山上安装仪器,进行跟踪。Allison(1989)在 1985 年和 1987 年夏末,将浮标观测系统固定在海冰上,并对这些浮标进行了长时间的跟踪,得到了浮标漂移的轨迹图。Park 等(1995)利用在 TOPEX/Poseidon 计划中获得的最初 18 个月(1992 年 10 月至 1994 年 3 月)的卫星高度计资料,计算出了南印度洋的表层平均流场,并与利用 70 年的历史资料计算的动力高度结果以及数值计算结果进行了比较,说明传统的动力计算无法揭示正压流以及地形作用的影响。最近,英国学者利用一个涡分辨率的数值计算模式(FRAM)对南大洋环流进行了模拟,其计算域覆盖了 24°S 以南的整个南大洋海区,纬向间距为 0.25°,经向间距为 0.5°,垂向分为 32 层。该模式模拟的结果给出了有关南大洋环流的更为详尽的图像。

南大洋著名的南极绕极流(ACC)是一支主要由盛行西风驱动的、东向的强大海流,是世界大洋中惟一东、西贯通的洋流。以往的研究表明,在普里兹湾海区的大陆架以北,主要流动是向东运动的 ACC 的一部分(Callahan, 1972; Jacobs, *et al.*, 1977; Smith, *et al.*, 1984; Middleton, *et al.*, 1989)。ACC 在流经普里兹湾海区以北的海域时,受到凯尔盖朗海台的阻挡使其环流形式有了很大的改变(Park, *et al.*, 1995)。乐肯堂等(1997)研究表明,普里兹湾海区的 ACC 具有相同量级的正压分量和斜压分量。在近岸区域,由于东风

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 3474 号。

国家自然科学基金资助项目,49876009 号。

收稿日期:1998 年 4 月 6 日。

的驱动,沿岸环流基本上是向西流动(Smith, *et al.*, 1984)。但是流动很不稳定,除了有向西的风生流动外,时而还出现向东的流动(Middleton, *et al.*, 1989)。在某些区段,南极沿岸流不仅是风生的,而且也含有斜压成分(乐肯堂等, 1997)。

普里兹湾内的夏季流场基本上是气旋型的。Grigor'yev (1967), Smith 等 (1984) 以及 Middleton 等 (1989) 均报道了湾内有一个封闭的气旋式流涡。乐肯堂等 (1997) 采用动力计算所得到的地转流场也呈现出类似的结构。但湾内的气旋式流涡是不稳定的,这与不稳定的东风的变化有关。

Middleton 等 (1989) 认为,在普里兹湾中,陆架水在近岸东风的作用下向西运动,在普里兹湾以西形成一支具有准地转平衡的沿岸流,这支沿岸流在陆架外缘有一个顺坡向下的分量,这一推断获得了 1985 年在普里兹湾内布设的三个浮标站资料 (Hodgkinson, *et al.*, 1988) 的支持,尤其是莫森站附近的 4 号浮标资料证实,该处接近冰冻的冷水有一个向海底运动的较大的顺坡分量。乐肯堂等 (1996, 1997) 的研究表明,由于陆架水与深层水在 400—600m 处混合后产生增密现象,增密后的混合水因其密度大于下层水的密度而下沉,从而产生了上述的向海底运动的顺坡流速分量。

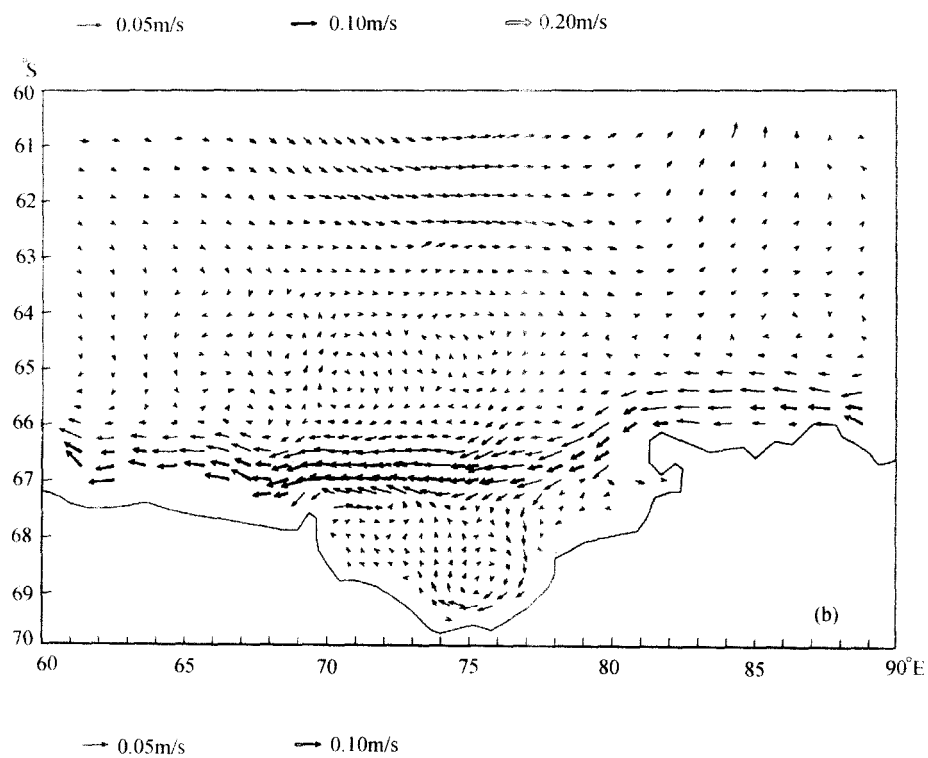
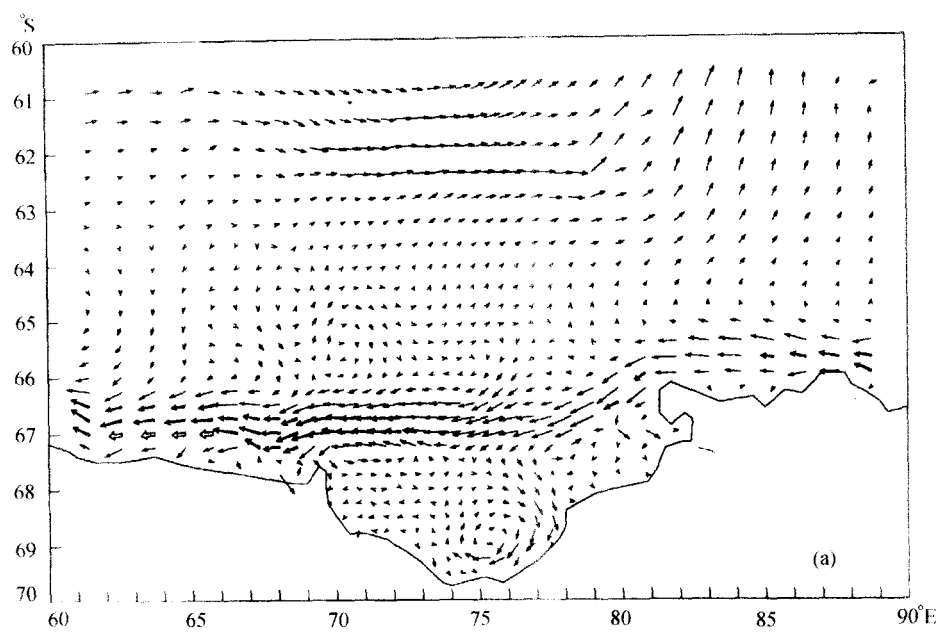
为了尽量消除初始条件对计算结果的影响,我们使模式进行 2 年的运算,在第 2 年的 2、5、8、11 月的 14 日输出结果,分别代表南半球夏、秋、冬、春四季的情况。

一、陆架区环流

图 1 给出本模式 (史久新等, 2000) 计算的夏季流场。由图 1 可见,夏季普里兹湾内存在一个近乎封闭的气旋式环流或流涡。这与以往的动力高度计算结果相一致 (Grigor'yev, 1967; Smith, *et al.*, 1984)。从我们的计算结果看,这个气旋式环流在各个层次上都存在,但其流型随深度又有所变化。在表层 (图 1a), 环流东侧流速明显大于西侧,最大流速出现在湾顶附近,为 0.033m/s,湾东部也有较大的流动。200m 层环流的流型与表层基本相同,流速总体上较表层小,但贴近湾顶的流动有所加强,最大流速达 0.036m/s (图 1b)。400m 层的环流由于地形限制和摩擦作用,范围和速度都比较小 (图 1c)。这个环流的中心在靠近湾顶的地方,恰是湾内水深最大处 (710m),由此说明该环流的存在与地形效应有关。需要指出的是,我们计算出的涡旋中心的位置与 Smith 等 (1984) 的结果不甚一致;而在 Middleton 等 (1989) 的结果中,此位置上却是一个不闭合的环流。这种差异的存在表明普里兹湾内的气旋型环流具有显著的年际变化。

在达恩利角以东的位置上,表层和 200m 层均有一个反气旋式的涡旋,且表层的涡旋基本上是闭合的,范围比较大。这与侍小兵 (1992)^① 的模拟结果基本一致。可以推断,这一涡旋的形成可能是由于湾内向西的流动遇到达恩利角和福拉姆浅滩的阻挡所致。图 1 表明,四女士浅滩附近的流场比较混乱。四女士浅滩是由 4 个排成一系列的小海山组成的,海山的中心深度均在 200m 以浅,而它们之间的海沟深达 400m,这使得该处的水深变化十分复杂,一般说来,在这种海域中似难以出现完整的中尺度闭合型环流。Grigor'yev

^① 侍小兵, 1992, 南极普里兹湾夏季流场诊断分析 (硕士论文)。



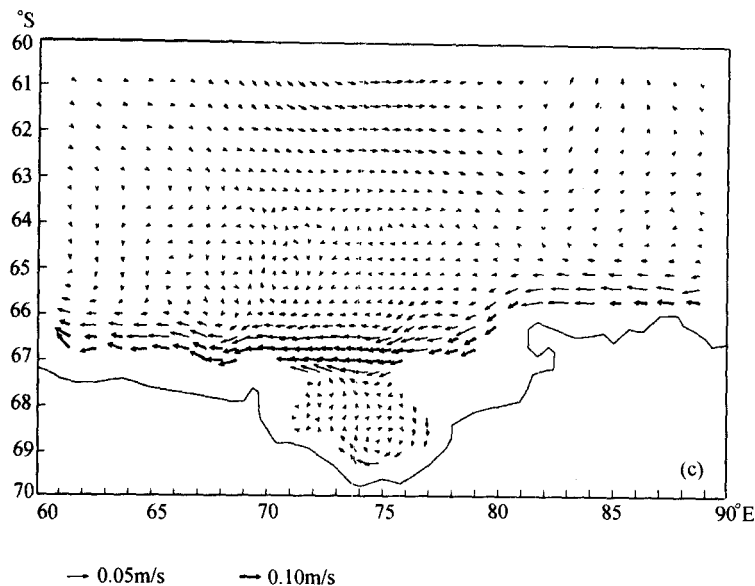


图1 夏季流场

(a)表层; (b)200m层; (c)400m层

(1967)曾指出,此处有一弱的气旋式环流,侍小兵(1992)的计算结果也表明了这一点。在我们计算出的表层流场中不太容易分辨出这个环流,只是在浅滩北侧有一支小型的向东的逆流。

我们的计算结果表明,普里兹湾与外海的水交换非常弱,这里的水交换主要发生在湾口中间部位。在表层,四女士浅滩西侧有一部分水流入普里兹湾,流速在 0.2m/s 以下;在普里兹湾的西口,有少量水随着达恩利角东侧的那个反气旋型涡旋流出湾外。比较而言,湾口东部进入的水量大于湾口西部。200m层的情况与之类似,只是水从西部流出的速度有所增大。到400m层,湾口处只余下流向湾外的一支水流,其速度仍有 0.019m/s 。与表层的情况相对照,从水量平衡的观点来看,应有一部分水是在表层从湾口偏东流入,而在深层从湾口中部或偏西部流出,这表明湾内存在垂向的流动。在四女士浅滩与海岸之间的较深的海沟区没有发现海水流入普里兹湾。这与四女士浅滩附近复杂的地形有关。更重要的是西冰架上伸出的巨大的冰舌阻挡了西向沿岸流。冰舌断裂后,此处的水将会更容易流入普里兹湾。

总体上看,普里兹湾内水的流速比较小,与湾外水的交换也比较弱,这是由于普里兹湾的特殊地形造成的。

从图1可以看出,普里兹湾附近沿岸海区最明显的流动是一支连续的西向流,这支流的流轴基本上与陆坡平行,其特征是:在西冰架外大体沿 66°S ,在普里兹湾东北略微折向南,然后又恢复西向。它的流幅变化不大,基本上在一个纬距之内。Smith等(1984)和 Middleton等(1989)的动力计算结果都表明,在福拉姆浅滩处有连续的西向流存在,流轴与岸线平行。卫星高度计资料的分析结果(Park, *et al.*, 1995)以及浮标跟踪的结果(Alli-

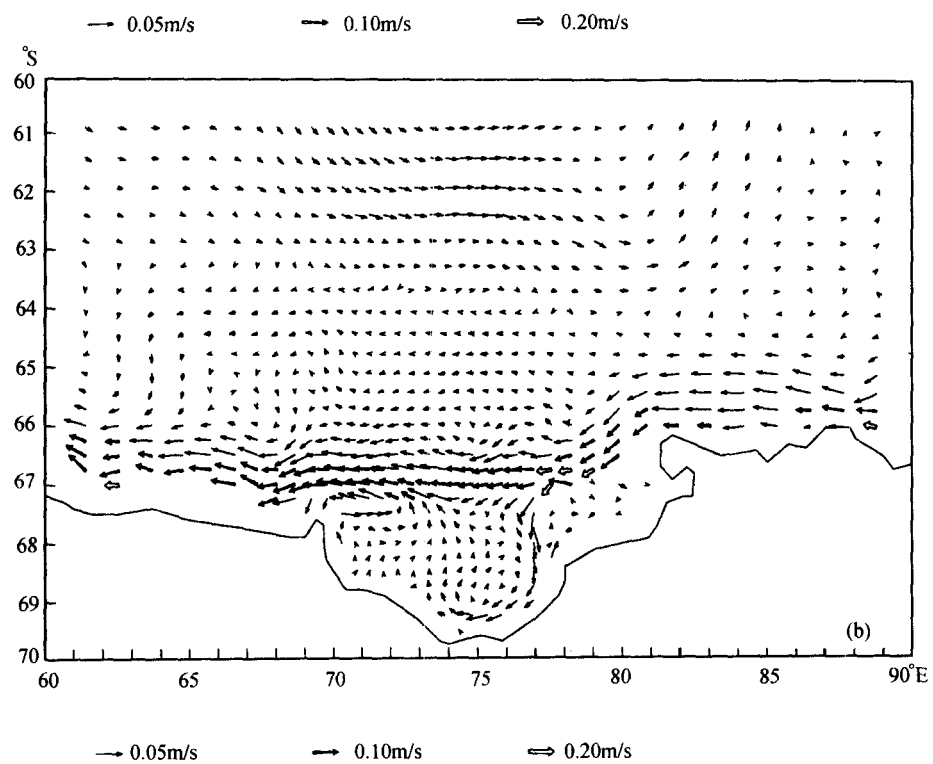
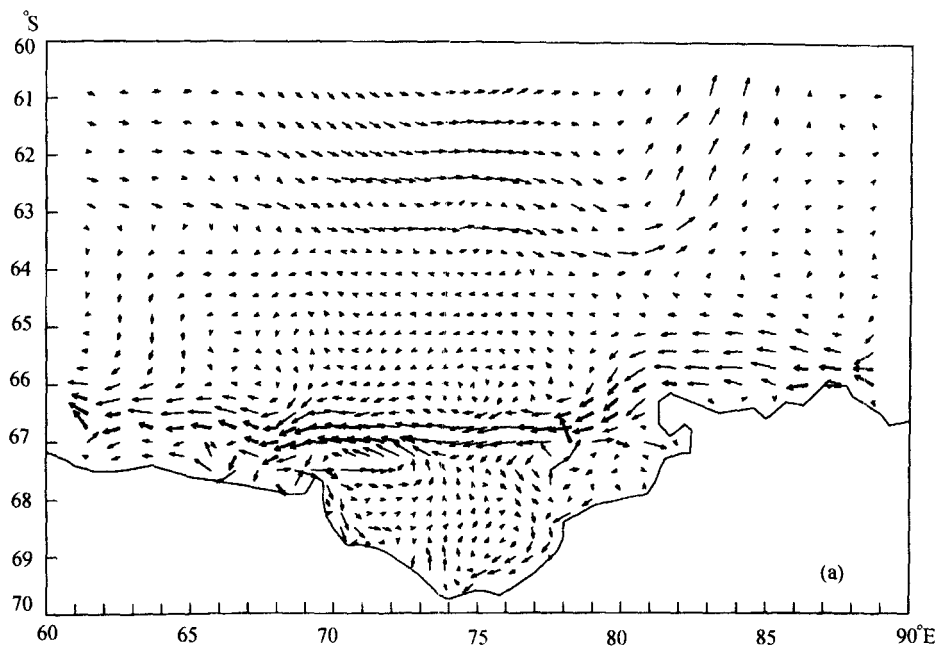
son, 1989)亦可以说明在 60° — 70° E 存在一支西向流,这与我们的模拟结果是一致的。至于海区东部西冰架外的环流情况,以往的研究则有不同的结果。Smith 等(1984)的计算结果表明此处存在一支西向流动,但 Middleton 等(1989)的计算结果却恰恰相反,显示出近岸为东向流,且是不连续的。从他们所示的图上可以看出,靠近岸边的测点非常少,近岸区域的海流带有相当大的主观推断的成分,因此,很难说哪种情况符合实际。比较而言,我们模拟出的近岸流场与 Smith 等(1984)的结果更为接近(即在西冰架外为西向流),而在普里兹湾口附近的流动情况,却与以往的研究结果有较大差别。Smith 等(1984)的结果表明,从西冰架外来的西向流绝大部分流入普里兹湾内,形成一个气旋型环流;我们的模拟结果则显示,西向流的大部分在流经普里兹湾口时并没有转向,而是继续向西,只有很少的一部分进入湾内。考虑到这支西向流主要是沿陆坡运动的,在普里兹湾口又有福拉姆和四女士两个浅滩的阻挡,因此它不太可能大幅度地折入湾内。由此可见,我们的结果似乎更合理一些。

总之,我们模拟出的沿岸流与以往的结果有一定的差异,其原因可能为:①数值计算中用的是月平均的大气强迫场无法反映短周期(如几天)的天气过程,而南大洋海区是气旋多发带,这种过程是经常发生的,因而必然会对实测的流场产生影响,但这种影响无法反映在本模式中;②采用的初始场只有经向变化,在纬向是均匀的,这在大洋中比较符合实际,但在近岸区它就有变化,特别是在像普里兹湾这样凹进的海湾区;③这支流动所处的位置恰是水深变化剧烈的陆坡,从水深图上可以看到在 66° S— 67° S 之间,水深从大于 2000m 迅速变到 500m 左右,因此在这种区域应该存在沿等深线的流动。

普里兹湾海区秋季的表层环流(图 2a)与夏季非常接近,只是在斯多里格浅滩处的流动不如夏季强(均在 0.1m/s 以下),而且近岸的流场比较乱,这是由于该季节海冰已经开始形成,使海流对风应力的响应受到影响。湾内的环流没有太大变化,而福拉姆浅滩西侧的环流则有所加强,并向湾的中部扩展,从表层和 200m 层都可以看到这一情况。在 200m 层,四女士浅滩附近有较大的流动(图 2b)。而 400m 层的流场与夏季相比几乎没有什么变化(图 2c)。

本文模拟的结果显示,普里兹湾海区表层的冬季流速增大了,这在达恩利角以南的区域最为明显(图 3a)。沿岸区流场较乱,出现很多向东的逆流,特别是在四女士浅滩处,形成一支连续向东的流动。湾内的环流已不很明显,而福拉姆浅滩西侧的环流却进一步增强,其东侧已伸达普里兹湾中部。冬季,该区域的混合层厚度一般为 10 到 20m,因此这里的所谓表层流速实际上包含了冰下的较深层次的流动,即模拟给出的表层流实际是整个混合层的平均流动。而整个普里兹湾及沿岸水域在冬季几乎完全封冻,海冰密集度在 0.8 以上,因海冰的存在会阻碍风对海流的驱动,故表层的实际流速较小。与表层类似,200m 层和 400m 层的流动也相应加强(图 3b,c)。这说明冬季流速的增大并不只是风力增大的缘故,也是斜压作用的结果。

普里兹湾海区春季的表层近岸流场(图 4a)与秋季相仿,湾内的环流再次清晰可辨,流速较夏、秋季大。这一特征在 200m 层也很明显(图 4b),但 400m 层的流动则与冬季的情形比较接近(图 4c)。



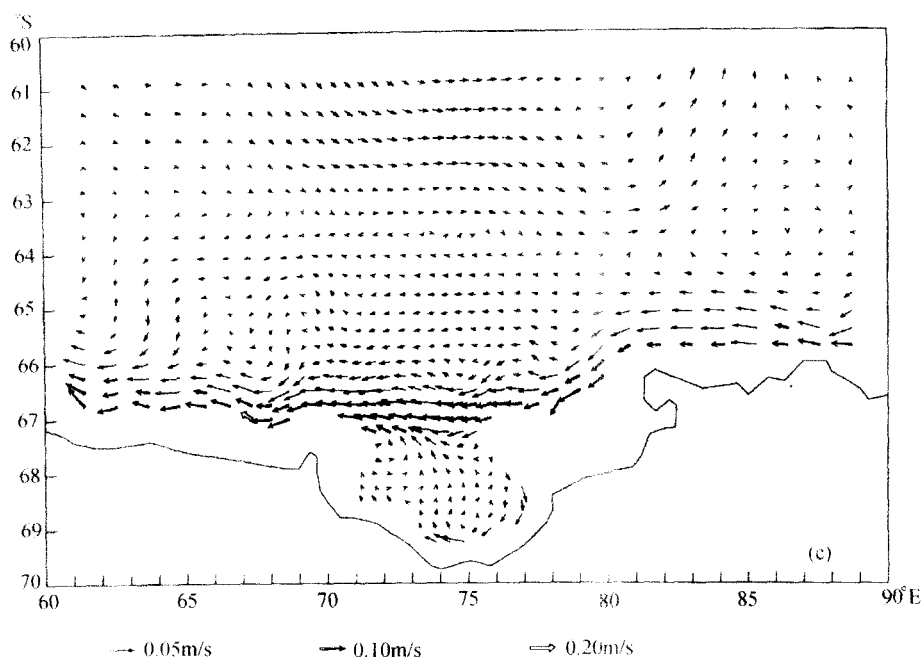


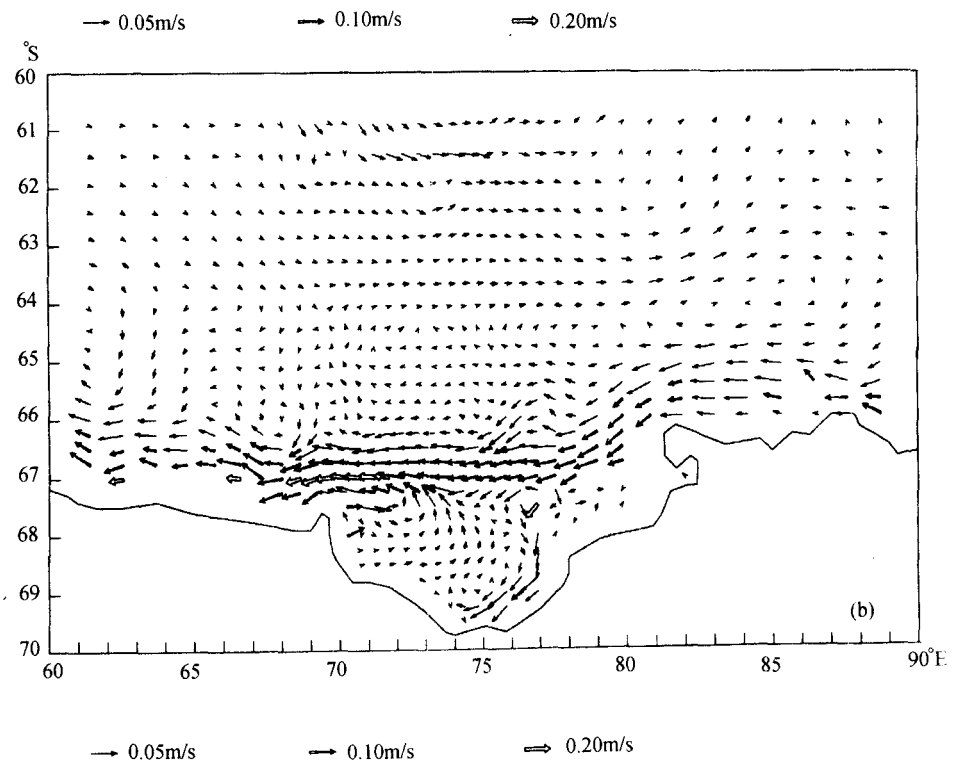
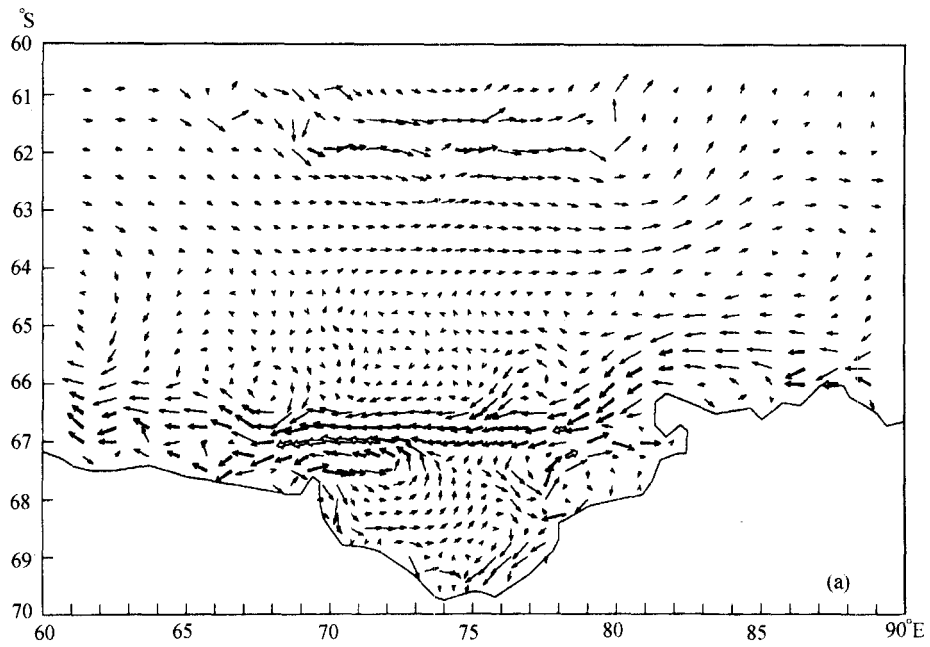
图2 秋季流场

(a)表层; (b)200m层; (c)400m层

二、深水区环流

普里兹湾海区 60°S 以南的夏季深水区表层环流(图 1a)大体以 64°S 为界,北边是向东的 ACC 的一部分,可以看出 ACC 含有相当大的非纬向成分。在海区西部,向东运动的 ACC 受到凯尔盖朗海台的阻挡而折向南,在普里兹湾口外,ACC 的南界伸到 64°S 附近。绕过海台后,ACC 急剧地转向北,在海区东部,流动几乎是沿着经向的。 64°S 附近为南极辐散带,从图上可以发现在这一区域中存在许多涡旋形的流动。比较明显的涡旋有三个,它们的中心位置分别为 67°E 、 68°E 和 70°E 。这三个涡旋从表层直到 400m 层都清晰可见(图 1a,b,c)。Zverev(1963)曾认为 63°S 以南的环流是由许多中心位于辐散带的大流涡构成,这些涡旋构成的西向漂流并不是连续的。Smith 等(1984)也有类似的看法。Zverev(1963)提出在 60° — 100°E 之间存在一个大型的气旋型涡旋,而 Smith 等(1984)进一步指出,根据他们的计算结果,这里的涡旋实际上是由并列在一起的两个涡旋构成的。从我们模拟的结果看,这里的流场则要复杂得多,包含了多个闭合和不闭合的流涡。从 Allison(1989)给出的浮标轨迹图可见,2、3、4 号浮标的运动路线大体相同,先向西,后转向北。而从附近出发的 6 号浮标的运动情况则有很大不同,这也说明了该区域流场的复杂性。正如乐肯堂等(1996)所指出的,在辐散带周围的流涡具有显著的时空变化。

本文模拟的结果(图 1a)显示,西冰架外海的流动已转为北向,这与动力计算(Smith, *et al.*, 1984; Middleton, *et al.*, 1989)和直接观测的结果(Smith, *et al.*, 1993)一致。在表层,这支向北的流动位于约 80° — 90°E 的范围内,但在下面的层次中由于流速较小,向北



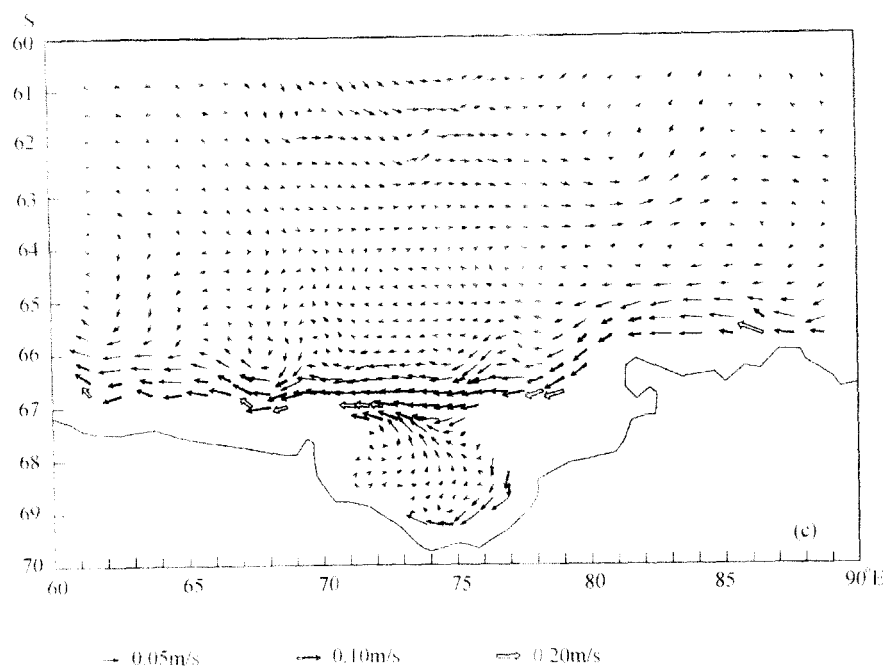


图3 冬季流场
(a)表层; (b)200m层; (c)400m层

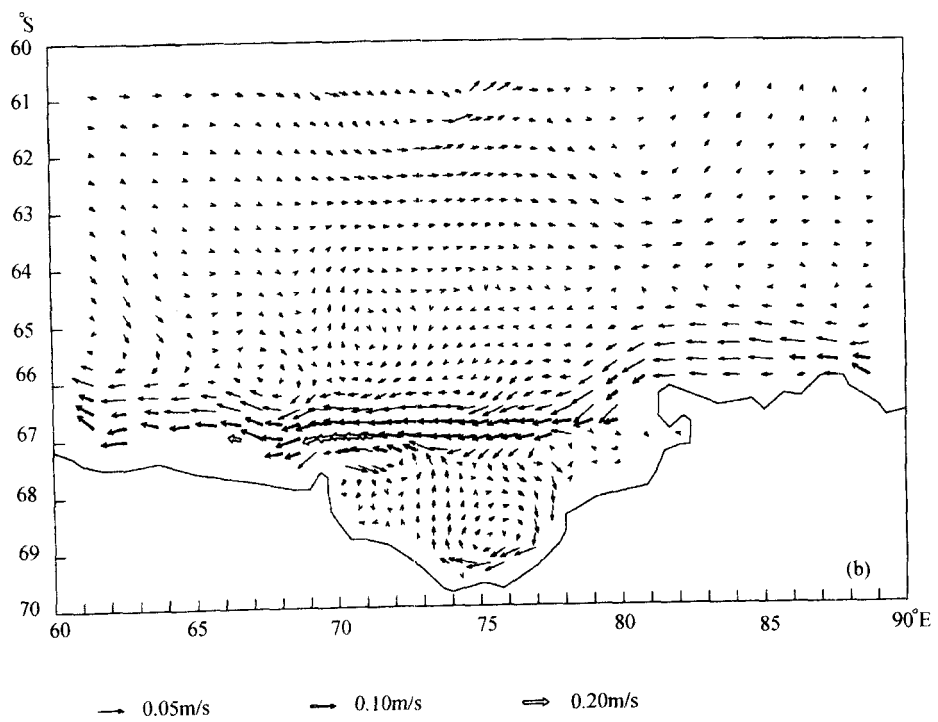
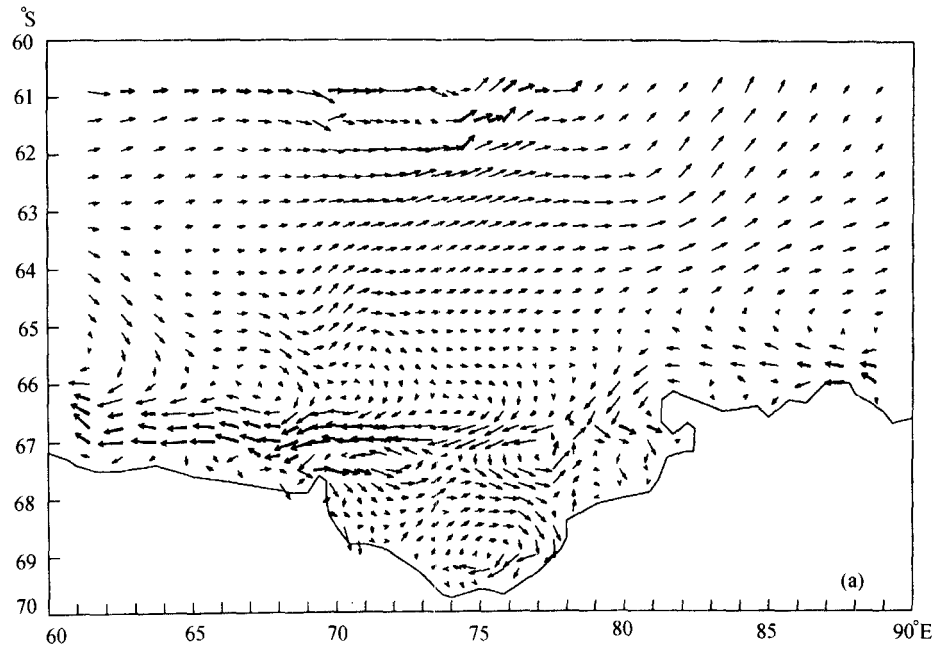
的趋势并不是很明显。

在 Smith 等(1984)和 Middleton 等(1989)的动力高度图上, 60°E 附近的近岸区域有一支向北的流动。但我们的模拟结果恰恰相反, 此处的流动是向南的。根据 Park 等(1995)的观点, 这里是顺时针的威德尔环流的东边界, 流动应该是向南的, 卫星高度计和 FRAM 模拟的结果也表明了这一点。由此看来, 基于动力高度计算的结果是否反映了这里的真实流动还需要进一步探讨。或许这一问题也可以归因于年际变化, 因为在利用 70 年的历史资料得到的动力高度计算结果中, 该处的流动也基本是南向的 (Park, *et al.*, 1995)。

秋季 ACC 的南界虽然仍维持在 64°S 以北, 但流速较夏季明显增大, 而且经向分量减小。西冰架外的流动(图 2a)在 64°S 附近的辐散带中形成了一个很弱的气旋式环流, 而在 70°E 附近仅余下一个较明显的环流。这些环流在各层次上大致相同(图 2a, b, c)。

冬季 ACC 的流速进一步增大, 并且流幅向南推进。秋季出现在辐散带中的涡旋依然存在, 且由于流速增大而更为明显。另外在表层, 凯尔盖朗海台以南区域中的流向很乱, 似乎存在更为复杂的涡旋系统(图 2a)。

春秋表层 ACC 的流速较冬季减小, 但流幅进一步向南扩展(图 4a)。ACC 最南端已前进至 66°S (靠近普里兹湾口), 而在 200m 和 400m 层, ACC 最南只到 64.5°S (图 4b, c), 与冬季相仿。这个季节的风应力与其它季节相比其南向分量明显增大, 这可能是产生上述现象的主要原因。



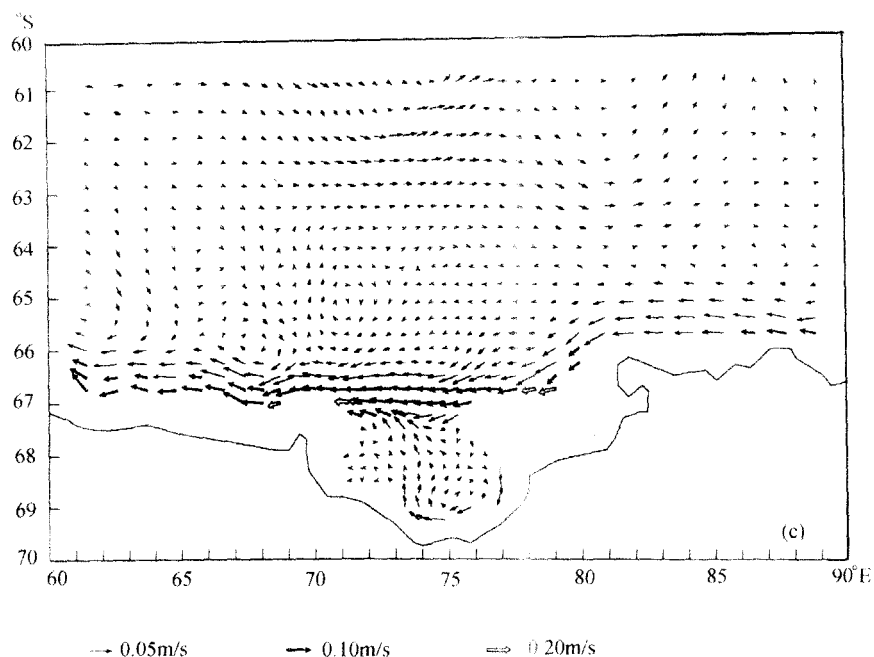


图4 春季流场
(a)表层; (b)200m层; (c)400m层

三、深层环流

由于资料和方法所限,以往的研究很少涉及普里兹湾海区的深层环流。图 5a,b 给出了模拟得到的 1000m 和 2000m 层的流场(因为在这么深的层次上,环流的季节性变化非常小,故这里只给出夏季的情形)。在普里兹湾口外,深层环流的速度较小,均在 0.06m/s 以下。较大的流速出现在陆架坡折处,而在辐散带,流速很小。 66°S — 67°S 之间那支西向流在深层也存在,除个别点外,流速均在 0.05m/s 以下。与上层的情形相对照,模拟出的这支流动速度随深度递减,方向仍与陆坡平行。1000m 层上,在凯尔盖朗海台东南有两个反气旋式的涡流,这里正是凯尔盖朗海台上的两个小海山,显然该涡旋的出现与地形效应有关。

从图 5 可以看出,绕极流区的流速随深度的增加而递减,在 400m 层,ACC 最大流速为 0.14m/s (图 1c),但至 2000m 层它已变得很小,只有 0.06m/s (图 5b)。由于没有实测资料可供对照,模拟结果有待于进一步验证。

四、垂向环流

研究垂向环流的结构有助于了解普里兹湾海区深层混合的情况。图 6 给出了 200m 层上的垂向流速。可以看出,在普里兹湾海区沿岸广泛分布着下降流。这是因为沿岸向

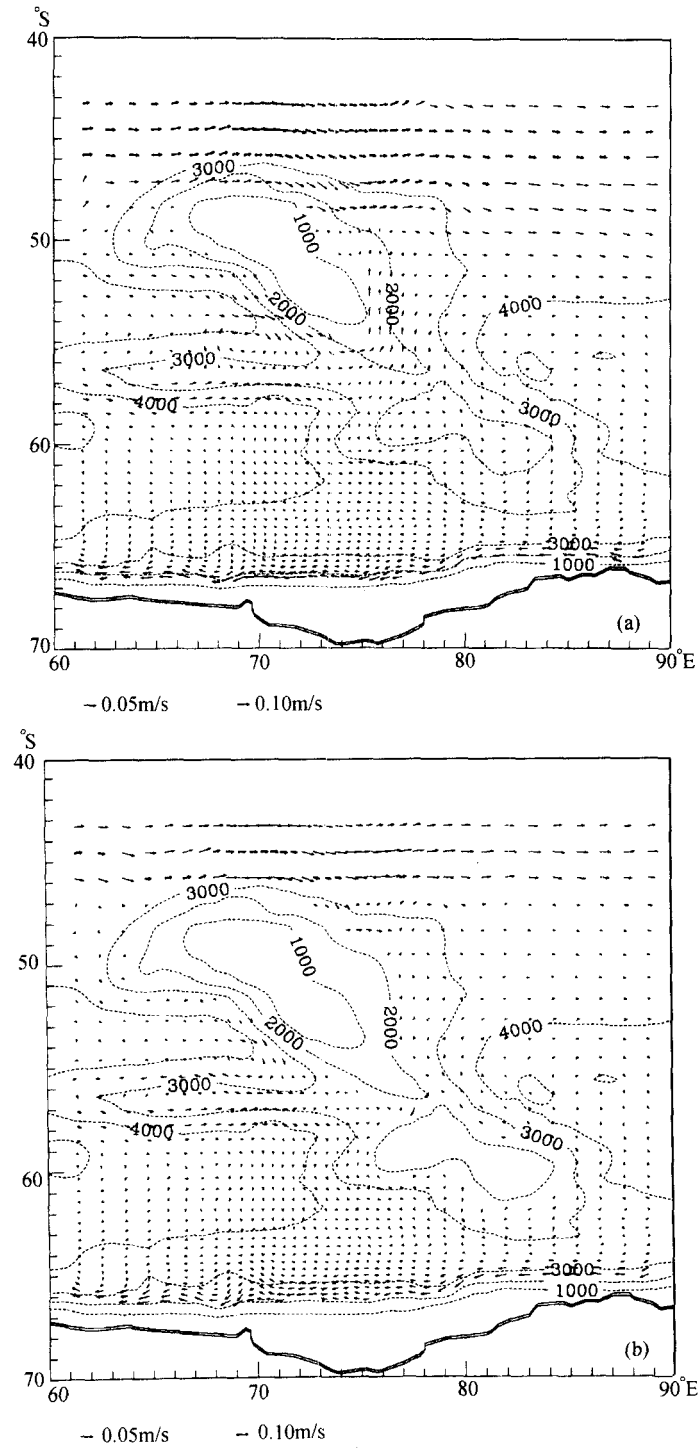
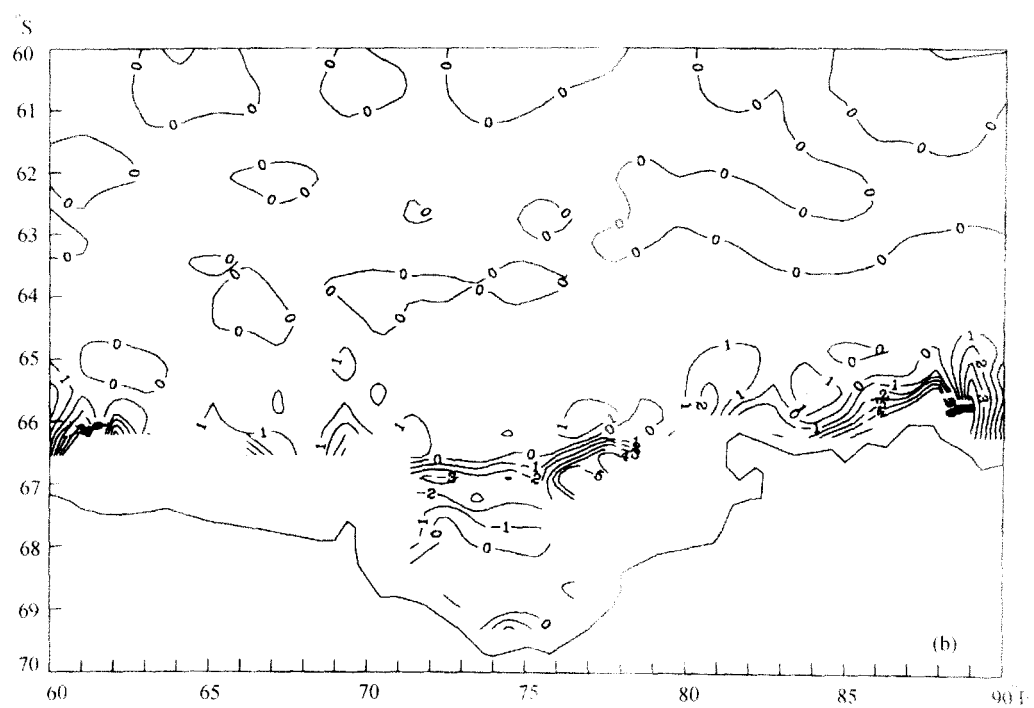
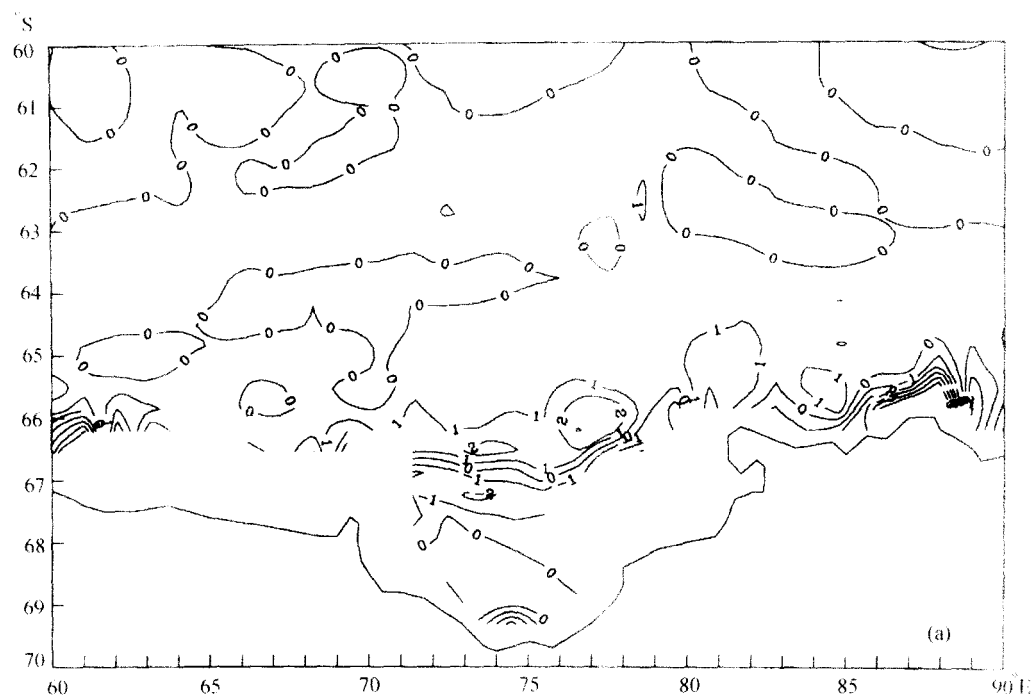


图5 夏季深层流场[虚线为等深线(m)]
(a)1000m层; (b)2000m层



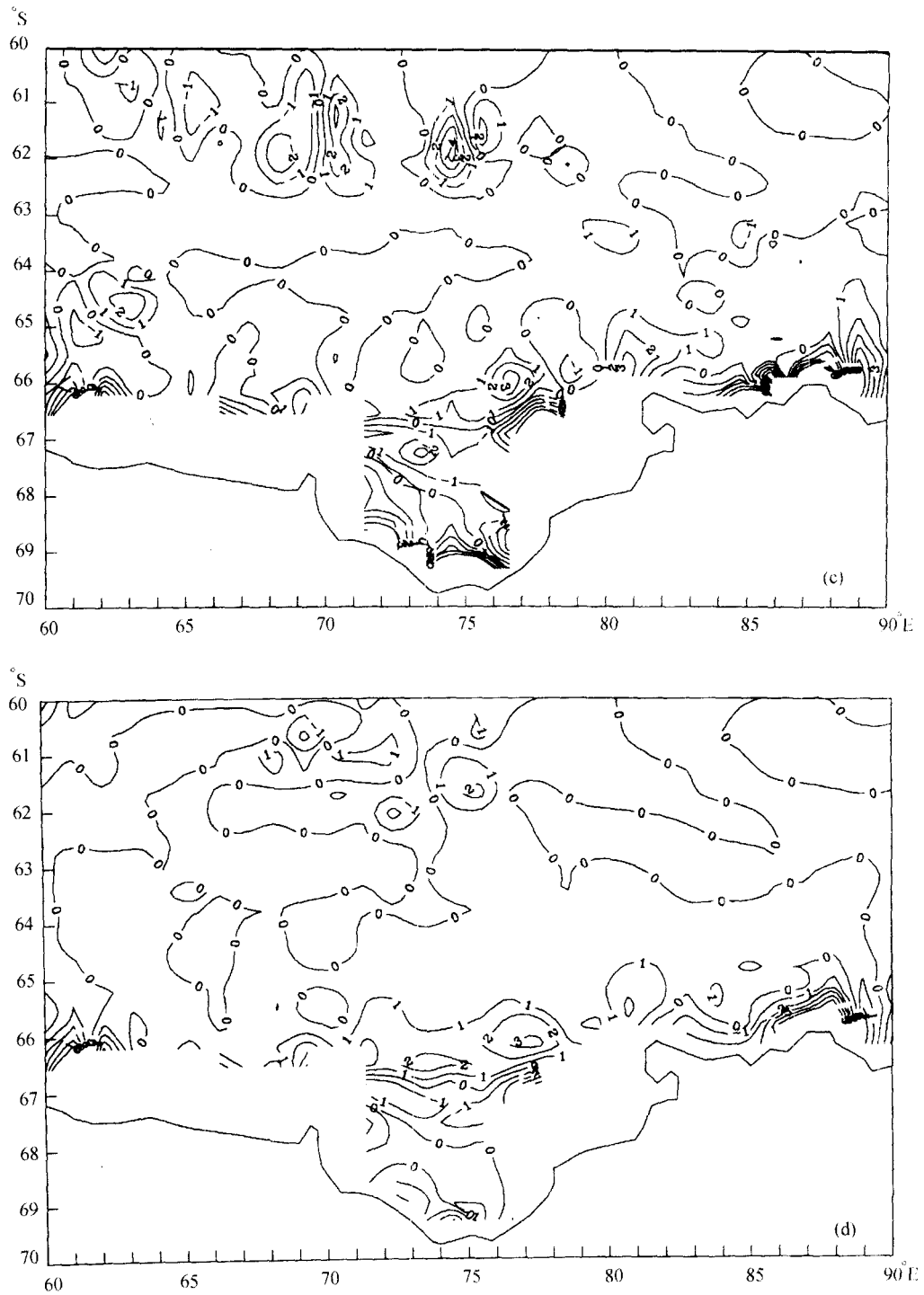


图 6 200m 层垂向流场的流速分布(m/d)

(a)夏季; (b)秋季; (c)冬季; (d)春季

西的那支流动在科氏力的作用下左偏后,遇到海岸的阻挡,在陆架上产生一个向下的分量,形成下降流。因此,普里兹湾口附近的垂向环流情况应当引起注意。夏季(图 6a),沿湾口是一个较宽的下降流区,与之相邻的湾外区域则是上升流区。与水平流场(图 1b)结合起来看,说明湾内的水可以在湾口附近下沉到 200m 以下,并在西侧流向湾外,而湾外的水可以升到 200m 以浅,有时甚至可以进入湾内。所以这里很可能是深层水上升和陆架水下沉的区域,只是在现有的模式中还无法给出这种关于水团及其混合过程的定量数据。

进入秋季后,湾口的下降流区域增大,流速也变大,而外面的上升流区几乎消失,仅在东西两边占很小的区域(图 6b)。这可能与该季节降温以及海冰结冰析盐而导致上层密度增大有关。到冬季,整个海区的垂向环流结构变得很复杂(图 6c)。普里兹湾顶部有强的上升流区,东西两侧为下降流区,因为没有考虑艾默里冰架的作用,所以湾东侧顶部的上升流的真实性值得怀疑。另外,在凯尔盖朗海台附近也存在较强的垂向运动,这可能与冬季混合层增厚有关。春季的情形(图 6d)介于冬、夏之间。湾口有相邻的下沉/上升带。湾底以及凯尔盖朗海台处仍有垂向运动,不过量级较冬季为小。

正如 Smith 等(1993)所指出的,由于该海区的观测资料在空间上和时间上均不够密,事实上人们还不能了解该区流场的全貌。尽管数值模拟的结果有助于加强这方面的了解,但是由于目前在数值模式中边界条件和有关参数的确定还不能达到令人满意的程度,因此本文的模拟结果尚需进一步的验证。

参 考 文 献

- 乐肯堂,史久新,1997,南极普里兹湾区环流与混合的研究,海洋科学集刊,38:39—52。
- 乐肯堂、史久新、于康玲,1996,普里兹湾区的水团和热盐结构的分析,海洋与湖沼,27(3):1—8。
- 史久新、乐肯堂、于康玲,2000,普里兹湾及其邻近海区冰海相互作用的数值研究 I. 模式,海洋科学集刊,42:10—210。
- Allison, I., 1989, Pack-ice drift off East Antarctica and some implications, *Ann. Glaciology*, 12:1—8。
- Callahan, J. E., 1972, The structure and circulation of deep water in the Antarctic, *Deep-Sea Res.*, 19:563—575。
- Grigor' yev, Y. A., 1967, Circulation of the surface waters in Prydz Bay, In: Soviet Antarctic Expedition, 7: 74—76。
- Jacobs, S. S. and D. T. Georgi, 1977, Observations on the southwest Indian Antarctic Ocean, A Voyage of Discovery, *Deep-Sea Res.*, 24(Supplement):43—84。
- Hodgkinson, R. P., R. S. Colman, K. R. Kerry and M. S. Robb, 1988, Water currents in Prydz Bay, Antarctica, during 1985, In: Australian National Antarctic Research Expedition Notes, 59:127pp。
- Middleton, J. H. and S. E. Humphries, 1989, Thermohaline structure and mixing in the region of Prydz Bay, *Deep-Sea Res.*, 36(8):1255—1266。
- Park, Y. H. and L. Gamberoni, 1995, Large-scale circulation and its variability in the south Indian Ocean from TOPEX/Poseidon altimetry, *J. Geophys. Res.*, 100(C12):24911—24929。
- Smith, N. and P. Treguer, 1993, Physical and chemical oceanography in the vicinity of Prydz Bay, Antarctica, In: Southern Ocean Ecology, 25—43。
- Smith, N. R., Dong Z., K. R. Kerry and S. Wright, 1984, Water masses and circulation in the region of Prydz Bay, Antarctica, *Deep-Sea Res.*, 31(9):1121—1147。
- Tchernia, P. and P. F. Jeamin, 1980, Observations of the Antarctic East Wind Drift using tabular tracked by satellite Nimbus (1975—1979), *Deep-Sea Res.*, 27:467—474。
- Zverev, A. A., 1963, Currents in the Indian sector of the Antarctic Ocean, In: Soviet Antarctic Expedition, 17:144—155。

A NUMERICAL STUDY OF THE ICE-OCEAN INTERACTION IN THE REGION OF PRYDZ BAY, ANTARCTICA II. CIRCULATION*

Shi Jiuxin, Le Kentang, Yu Kangling

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences)

ABSTRACT

The basic features of the circulation and its seasonal variations in the region of Prydz Bay were studied by using a coupled sea ice-ocean numerical model with isopycnal layering. The simulated results show that a continuous westward current as a part of the Antarctic Coastal Current along the shelf break, exists all the year round, and is mainly driven by an easterly wind. However, it cannot be clearly shown in the traditional dynamic topography map. It is very probable that the current has a strong barotropic component. In the region north of Prydz Bay, blocked by the Kerguelen Plateau, the Antarctic Circumpolar Current turns southward and shows a remarkable non-zonal component. The features of circulation and upwellings/downwellings in the study region are also described for the first time.

* Contribution No. 3474 from the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.