

## 普里兹湾区水团和环流时空变化的 若干问题

乐肯堂 史久新 于康玲 陈锦年

(中国科学院海洋研究所)

自 50 年代后期以来国际上对普里兹湾区海洋过程的调查研究不断加强(Zverev, 1959, 1963; Izvekov, 1959), 尤其是进入 80 年代后, 由于在现场考察中采用了 CTD 系统和浮标测流系统, 人们对该区海洋过程的认识有了长足的进步。但由于该海区的热盐结构有非常显著的时空变化(Kornilov, 1971; Smith *et al.*, 1984; Middleton and Humphries, 1989; 乐肯堂等, 1996, 1997), 因而对该海区水团和环流中的若干重要问题, 例如环流子午向分布问题, 底层水形成问题, 热盐结构时空变化问题等, 仍缺乏足够的了解。

在乐肯堂等(1996, 1997)的文章中, 我们主要根据中国第六次(CNARE-VI, 1989—1990)和第七次(CNARE-VII, 1990—1991)南极考察中的海洋调查资料, 分析了普里兹湾区的热盐结构、环流性质和混合过程。在本文中, 我们将着重分析中国第八次(CNARE-VIII, 1991—1992)和第九次(CNARE-IX, 1992—1993)南极考察中的 CTD 资料, 并结合 CNARE-VI, VII 的资料, 对该区的水团和环流的时空变化问题进行初步探讨。

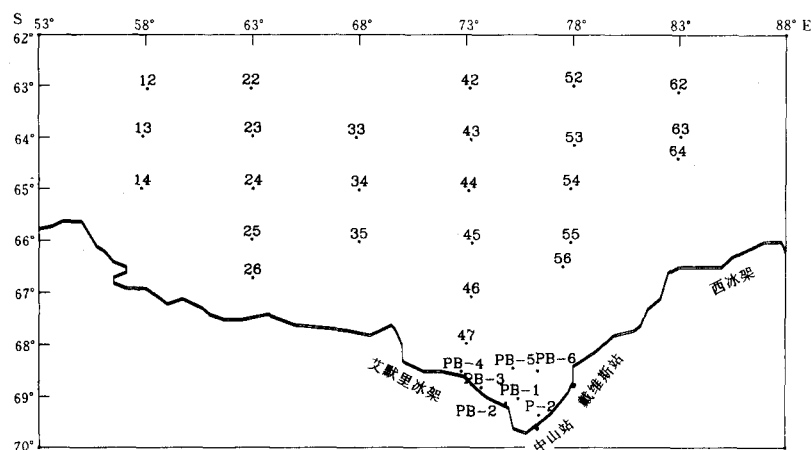


图 1 CNARE-IX 考察 CTD 站位图

\* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 3093 号。国家自然科学基金资助项目, 49376260 号。本文所用资料由我国第六、七、八、九次南极考察队水文组、化学组提供, 谨表谢忱。  
收稿日期: 1996 年 11 月 27 日。

关于 CNARE-VI 和 CNARE-VII 的资料概况可见乐肯堂等(1996),不再重述。CNARE-VIII 的 CTD 断面设置与 CNARE-VII 相同[参见乐肯堂等(1996)];但观测工作分为两个阶段:第一阶段从 1991 年 12 月 31 日至 1992 年 1 月 5 日,完成了从 78°E 至 108°E 共 6 个断面的测站;第二阶段,从 1992 年 1 月 23 日至 25 日,完成了 68°E 和 73°E 两个断面的测站。CNARE-IX 的 CTD 断面如图 1 所示;观测工作也分两个阶段:第一阶段从 1993 年 1 月 11 日至 1 月 15 日,完成了 I、II、III 3 个断面的测站;第二阶段从 1993 年 1 月 29 日至 2 月 5 日,进行了 IV、V、VI 3 个断面的观测。这两次考察的 CTD 观测,每次均分为两个航次,而两个航次之间又都相隔二十余天,因而资料的同步性受到一定的影响。

## 一、热盐结构的时空变化

图 2 和图 3 为由 CNARE-IX 考察资料给出的主要断面上水温分布。

从图 2、3 可见,1993 年 1—2 月和 1991 年 1 月实测的水温结构具有如下显著特征:

(1) 在 63°S(图略)和 64°S 的水温断面上,表层水的厚度约 40—60m,与 1991 年 1 月相比,厚度变化似乎不大。但在大约 50—200m 的层次上,水温低于  $-1.5^{\circ}\text{C}$  的冬季水却主要分布于 73—83°E 的区间内,在 68°E 以西区间的相应层次上却难以发现它的存在,这与 1991 年 1 月的情况(乐肯堂等,1996)形成鲜明的对照。

(2) 1993 年 1 月,强劲的绕极深层水在约 68°—73°E 的区间中可以上升到约 80m 层,其最高水温可达  $1.90^{\circ}\text{C}$  (300m 层, 73°E);而在 1992 年 1 月,这一水团的最高水温仅为  $1.71^{\circ}\text{C}$  (500m, 78°E),暖水上升以 78°—83°E 区间较强。相比之下,1991 年 1 月,绕极深层水的最高温度竟为  $2.32^{\circ}\text{C}$ ,而且出现在 73°E 断面上,高于  $2^{\circ}\text{C}$  的水竟位于 110—170m 的层次上,且强烈的上升区位于约 71°—84°E 的区间内。

(3) 对比 1993 年 1 月 63°E 断面和 73°E 断面的水温和盐度分布,可以发现一个值得深思的现象,即在 63°E 断面上,63°—64°S 区间内,约 50—100m 的层次上出现一块冷水。这一冷水的存在使 63°S 处的绕极深层水(其核心的水温为  $1.90^{\circ}\text{C}$ , 400m 层)在向南推进过程中上升到上表层(60—70m)的位置,向南推移了约 1 个纬距(65°S 处)。上述冷水块的核心温、盐度为  $-1.45^{\circ}\text{C}$ 、34.00,从水团分类角度看,这一块冷水已经难以划入冬季残存水之列。这块冷水的存在使绕极深层水在 65°S 处能上升到 60—70m 的事实提示我们,探讨这块冷水形成的原因及其年际变化将具有重要意义。

(4) 在 64°S 断面上,1991 年 1 月的水温分布表明,强烈上升的暖水主要位于 70°—85°E 的区间。而 1993 年 1 月的水温分布表明,尽管在 64°S 断面上暖水上升的主要区域为 64°—75°E 和 80°—83°E,但若考虑到 65°S 的分布图,则可以认为暖水上升区应约为 56°—75°E 和 80°—93°E,显然这一区间远比 1991 年 1 月为大。

(5) 在 73°E 断面的陆架附近,1993 年 1 月与 1991 年 5 月的温、盐、密分布显示出明显的年际变化。1991 年 1 月,该断面陆架上的高盐陆架水在湾内底层的最大盐度可达 34.65,水温为  $-1.51^{\circ}\text{C}$ ,由此使  $\sigma_t$  达到 27.90。但在 1993 年 1 月,该处的盐度仅为 34.55,水温则为  $-1.88^{\circ}\text{C}$  (即  $\sigma_t=27.82$ )。问题在于,在 1993 年 1 月,这一区域 400m 层以深至陆架底部的水已从陆架水向冰架水过渡;因此,如果说在 1991 年 1 月,那里的高盐陆架水

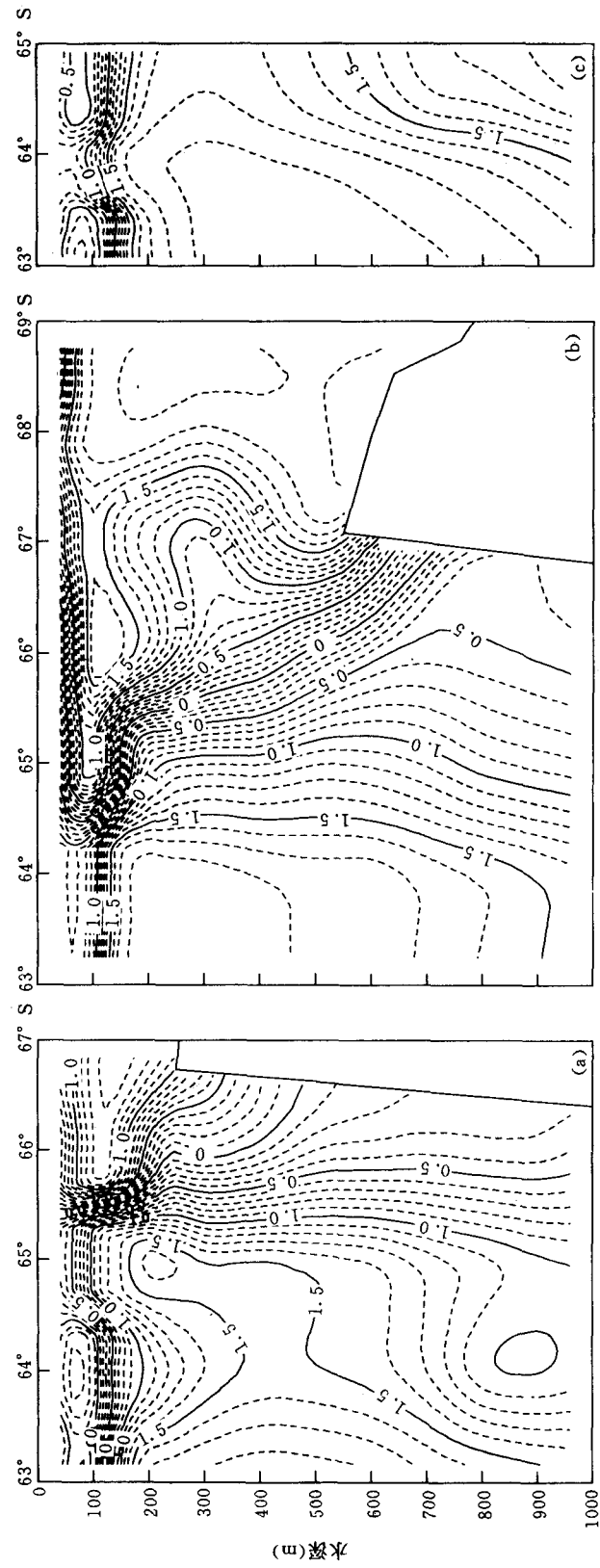


图2 1993年1—2月水温(°C)断面分布  
(a)63°E断面;(b)73°E断面;(c)83°E断面

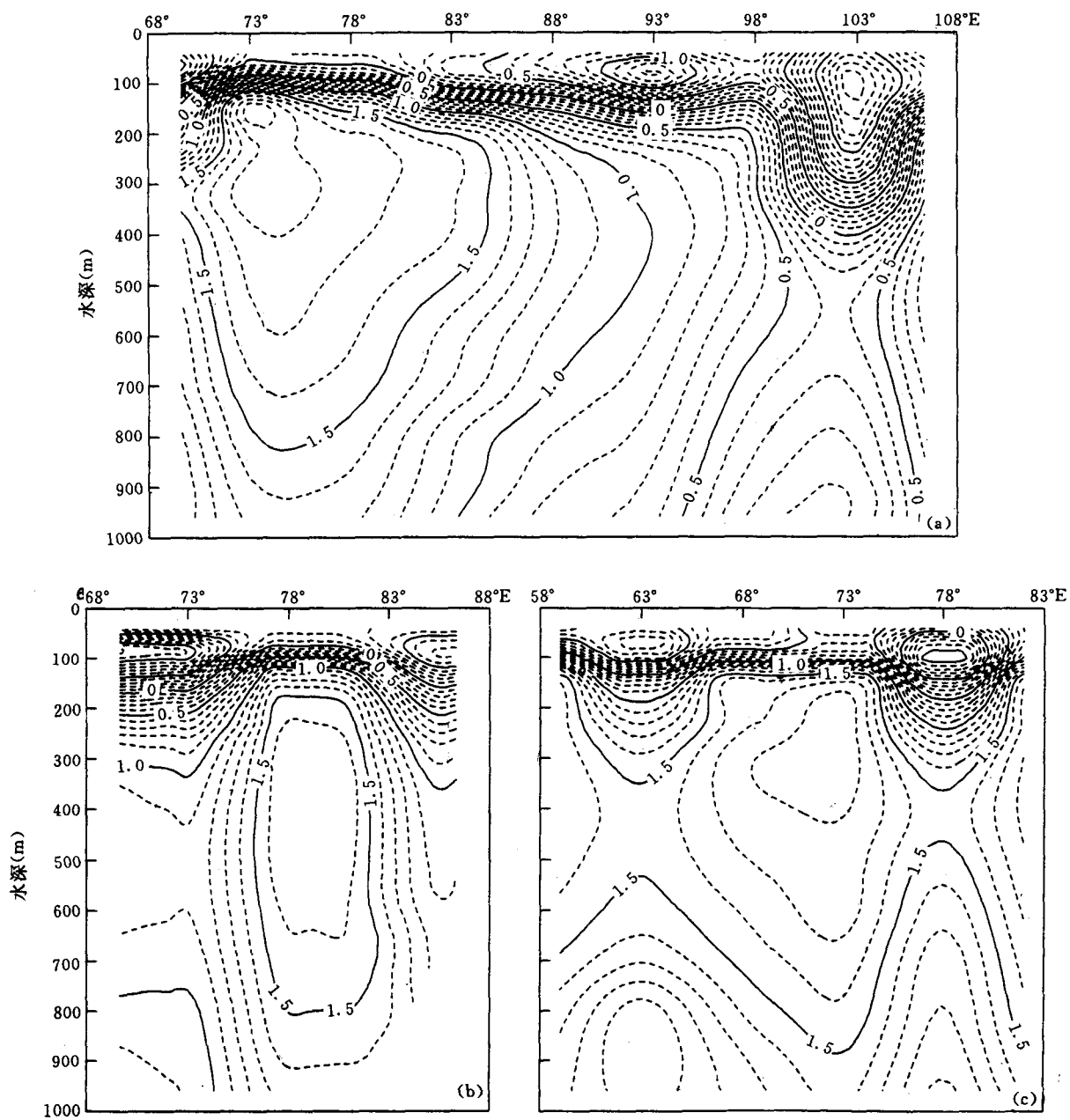


图3 64°S的水温(°C)断面分布

(a) 1991年; (b) 1992年; (c) 1993年

可能与绕极深层水混合而生成普里兹湾底层水,那么在1993年1月,这种较重的普里兹湾底层水至少在陆架上没有条件生成。

## 二、关于水团分布的时空变化

关于普里兹湾区水团特性及类型问题,Smith 等(1984)、Middleton 和 Hamphries (1989)曾作了不尽相同的分析。他们之间的不同看法,归结起来有如下三个方面:(1)按 Smith 等(1984)提出的指标,低盐陆架水是否一定存在;(2)Middleton 等(1989)提出的普里兹湾底层水是否有可能存在;(3)本区的南极底层水是来自威德尔海还是有可能在当地生成。为了解答上述疑问,我们在上篇文章(乐肯堂等,1996)中根据 CNARE-VI 的资料,对本区水团结构问题作了初步分析。该分析表明,上述诸疑问的存在正是本区水团分布时空变化的写照。因此,为了较为确切地搞清上述疑问,必须以本区多年实测资料为基础,探讨本区水团分布的时空变化特征。由于资料所限,在本节中只能根据已收集到的资料对此问题进行初步分析。

关于水团分析的基本方法和各主要水团的特征指标,在乐肯堂等(1996)的文章中已作了分析,这里仅将本区夏季主要水团的特征指标列于表 1。我们根据表 1 的特征指标,对 CNARE-VI—CNARE-IX 航次的 CTD 资料进行分析,给出了各断面中的水团分布图。因篇幅所限,在此仅给出 73°E 断面中 1991 年 1 月、1992 年 1 月和 1993 年 1 月的水团分布(图 4)。

表 1 普里兹湾区夏季主要水团的特征指标

| 水团名称           |                   | 水温和盐度指标                                                                                 |
|----------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 绕极深层水<br>(CDW) |                   | $0.5^{\circ}\text{C} \leq T \leq 2.0^{\circ}\text{C}$<br>$34.50 \leq S \leq 34.75^{1)}$ |
| 南极<br>表层<br>水  | 夏季表层水<br>(ASW)    | $-0.5^{\circ}\text{C} \leq T < 1.2^{\circ}\text{C}$<br>$33.50 < S < 34.56$              |
|                | 冬季表层水<br>(WW)     | $T < -1.5^{\circ}\text{C}$<br>$34.20 \leq S \leq 34.56$                                 |
| 陆<br>架<br>水    | 低盐陆架水<br>(LSSW)   | $T < -1.5^{\circ}\text{C}^{2)}$<br>$S < 34.25$                                          |
|                | 高盐陆架水<br>(HSSW)   | $T < -1.5^{\circ}\text{C}^{2)}$<br>$S > 34.50$                                          |
| 底<br>层<br>水    | 普里兹湾底层水<br>(PBBW) | $T \leq 0^{\circ}\text{C}^{3)}$<br>$S > 34.62$                                          |
|                | 南极底层水<br>(AABW)   | $T < 0^{\circ}\text{C}$<br>$34.60 \leq S \leq 34.72$                                    |

1) Smith *et al.* (1984)把绕极深层水的特征指标取为  $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 2^{\circ}\text{C}$ ,  $34.50 \leq S \leq 34.75$ 。

2) Smith *et al.* (1984)取温度约等于  $-1.8^{\circ}\text{C}$ 。

3) 按照 Middleton and Hamphries (1989)的定义。

可以看出,在所给出的三张图中,图 4(a)与其余两张图的主要不同点有三:(1)绕极深层水(CDW)扩展到了普里兹湾的陆架上;(2)在普里兹湾内形成了普里兹湾底层水

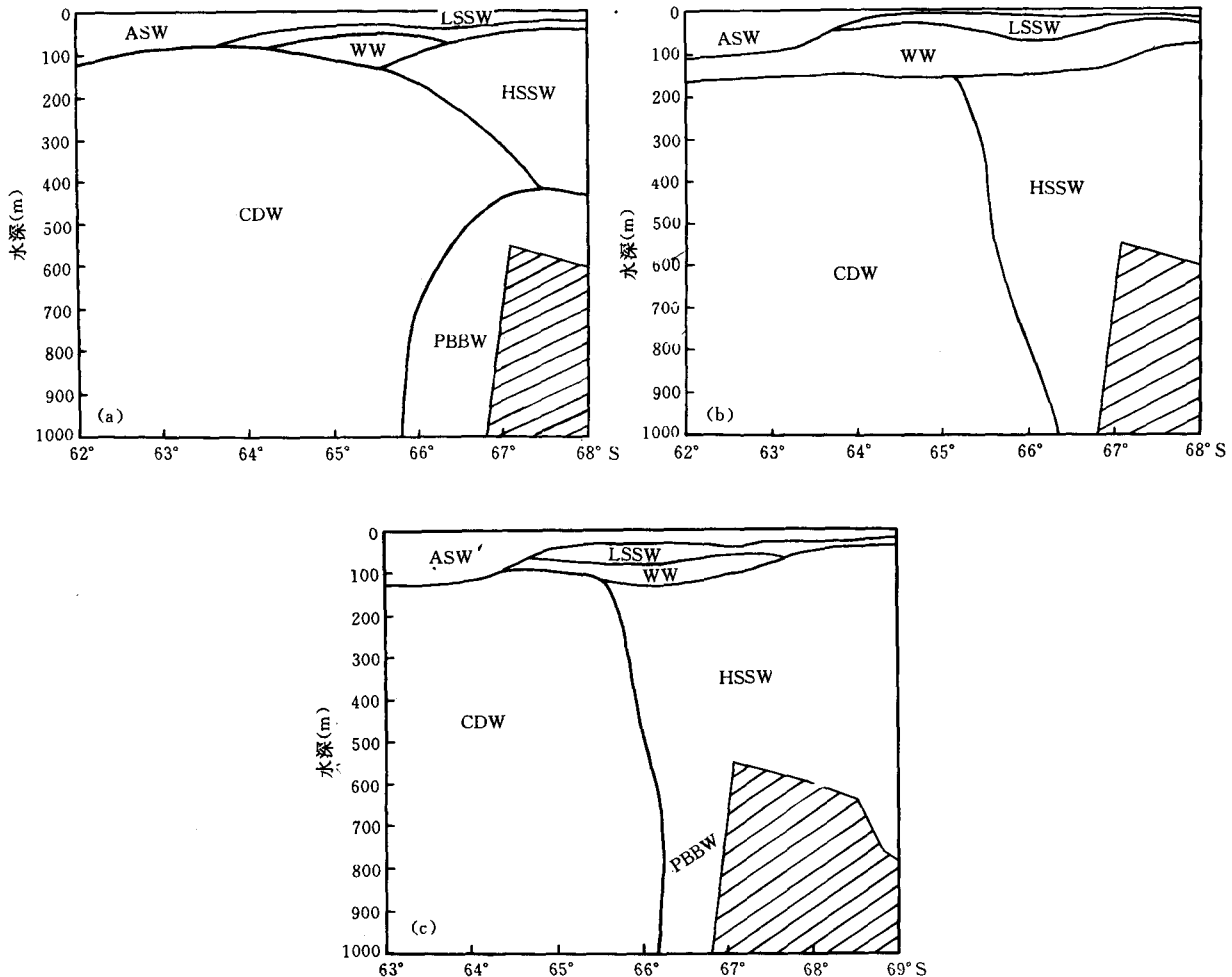


图4 73°E 断面上的水团分布

(a) 1991年1月; (b) 1992年1月; (c) 1993年1月

(PBBW); (3) 低盐陆架水作为一种夹层非常薄, 尤其是在普里兹湾湾内。

Foster 和 Carmack (1976) 认为, 在南极底层水形成过程中, 绕级深层水 (CDW) 能否上升并扩展到陆架上是一个关键因素。从图 4 可见, 1990—1993 年的四年中, 只有在 1991 年 1 月 CDW 扩展到了普里兹湾陆架上。换言之, 只有在 1991 年 1 月, 扩展到了普里兹湾陆架上的 CDW 与 HSSW (高盐陆架水) 混合后, 才在湾内产生了高密度 (由于混合增密效应) 的普里兹湾底层水 (PBBW)。Middleton 和 Hamphries (1989) 曾分析了称之为 FIBEX (1981 年 1 月—2 月), ADBEX1 (1982 年 11 月—12 月), ADBEX2 (1984 年 1 月), SIBEX2 (1985 年 2 月—3 月) 和 ADBEX3 (1985 年 10 月—11 月) 的澳大利亚南极考察资料。他们的分析表明, 仅在 ADBEX1 航次的资料中出现了存在 PBBW 的证据。由于在上述九个航次资料中, 只有在 1982 年 11 月—12 月和 1991 年 1 月在普里兹湾内出现了 PBBW。因此, 由图 4(a) 可以推测, 在 1982 年 11 月—12 月中, CDW 也扩展到了普里兹湾陆架上。同

时,上述分析还表明,普里兹湾区的水团分布有显著的时空变化,不仅有显著的季节变化,而且存在着显著的年际变化。

CDW 扩展到普里兹湾陆架上和 PBBW 的形成成为普里兹湾区南极底层水(AABW)的来源提供了一种新的可能性。Foster 和 Carmack(1976)指出,在威德尔海(Weddell Sea)中,深层对流是复杂的混合过程的结果。变性暖深层水(Modified Warm Deep Water, MWDW)是暖深层水(WDW)与冬季水(WW)的混合物。MWDW 侵入到陆架上并且在陆架坡折区与陆架水(SW)相混合而形成威德尔海底层水(Weddell Sea Bottom Water, WSBW)。WSBW 在陆架外流动,并由于其密度大于暖深层水(Warm Deep Water, WDW)而沿陆坡向下流动。这样,高密度的 WSBW 随着其下降而把 WDW 卷吸进来,形成了南极底层水(AABW)。现在的问题是,在普里兹湾外的陆架区是否也存在类似的过程?

当然,要完全弄清上述问题必须具有该海区足够的直达海底的 CTD 资料和直接测流资料。显然,显示存在 PBBW 的 ADBEX1 和 CNARE-VII 的资料尚不能满足这一要求。但是,利用现有资料,通过对环流和混合问题的分析,仍然有可能对上述问题作出部分回答(乐肯堂,1997)。

### 三、环流的时空变化

自从 80 年代以来,关于普里兹湾区的环流问题,已引起了若干学者的关注(Smith *et al.*, 1984; Middleton *et al.*, 1989; 乐肯堂等,1997)。在我们上一篇文章(乐肯堂等, 1997)中,利用 CNARE-VII 的资料探讨了普里兹湾区夏季环流的基本特征和性质。从上述几项研究中可以看出,普里兹湾区的环流具有如下显著特征:(1)南极辐散带以北,为向东的南极绕极流,这支海流既有正压分量也有斜压分量(ISOS, 1981; Smith *et al.*, 1984); (2)辐散带以南,存在着向西的沿岸流,但这支沿岸流在局部区域并不总是连续向西(Clifford, 1983); (3)普里兹湾内存在一个顺时针环流<sup>①</sup>; (4)西向的沿岸流与东向的南极绕极流之间为一辐散带,在本区,该南极辐散带周围时有涡旋(或流涡)出现(Smith *et al.*, 1984)。

Саруханян 和 Смирнов(1986)指出,南极绕极流具有显著的时空变化。事实上,从中尺度动力学的观点看来,南极沿岸流、南极辐散带的位置和南极辐散带附近的流涡都具有显著的时空变化。下面我们根据现有的资料来分析这些时空变化的基本特征。

#### 1. 南极绕极流的时空变化

南极绕极流的时空变化是一个非常复杂的问题,通常主要指其带状结构、流量和涡旋的时空变化。从理论上讲,当一支弱层化的向东的纬向流动通过水深变浅且子午向受到限制的区域时,有可能产生这种水平带状结构(Allen *et al.*, 1975),但是考虑到这种带状结构不仅存在于德雷克海峡,而且在整个南大洋都存在,故海气通量的分布和海冰的分布也对它有影响(Clifford, 1983; Nowlin and Klinck, 1986)。同时,南极绕极流中大量的中尺

<sup>①</sup> 侍小兵,1992,南极普里兹湾夏季流场诊断分析(硕士论文)。

度变异现象也与这一带状结构的时空变化有紧密联系。简言之,这些中尺度变异现象的时空变化有下列特征:(1)流核(current core)在南北方向发生位移,并在 10 天的时间尺度内可以位移达 100km(Hofmann and Whitworth, 1985);(2)南极绕极流中锋面上的射流发生蛇曲(meander),而且这些蛇曲不时发展成闭合的流环(Joyce and Patterson, 1977);(3)中尺度涡的空间尺度为 30km 至 100km,其表面流速的典型尺度为 30cm/s 或以上;(4)这些涡从表层到底层在垂直方向上都是连贯的(Bryden, 1983)。本研究区所在的南大洋、印度洋扇形区中,南极绕极流最主要的空间变化特征是在接近克尔格朗(Kerguelen)海脊(65°—80°E)时它出现分叉,大部分主流急剧向南转向到达 65°S,绕过该海脊后又重新急剧地转向东北并到达 50°S,且从 90°E 向东,其基本流动又大致沿 50°S 向东运动。在克尔格朗回环的最南部区,即在普里兹湾区以北的东向流动区中,实测流速已增强到 15—20cm/s。

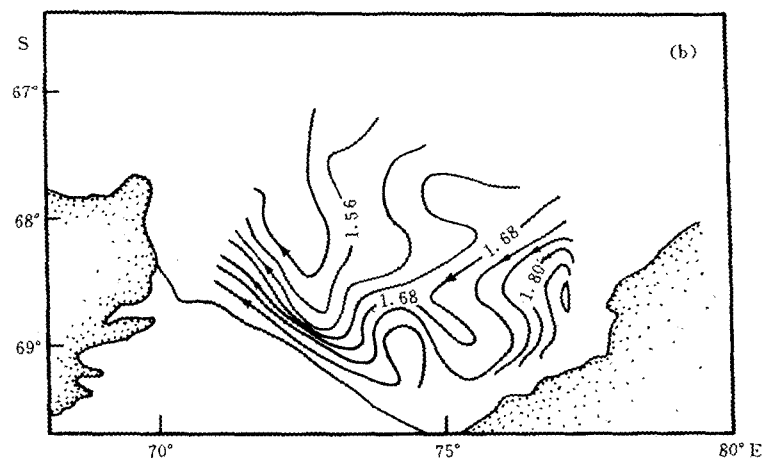
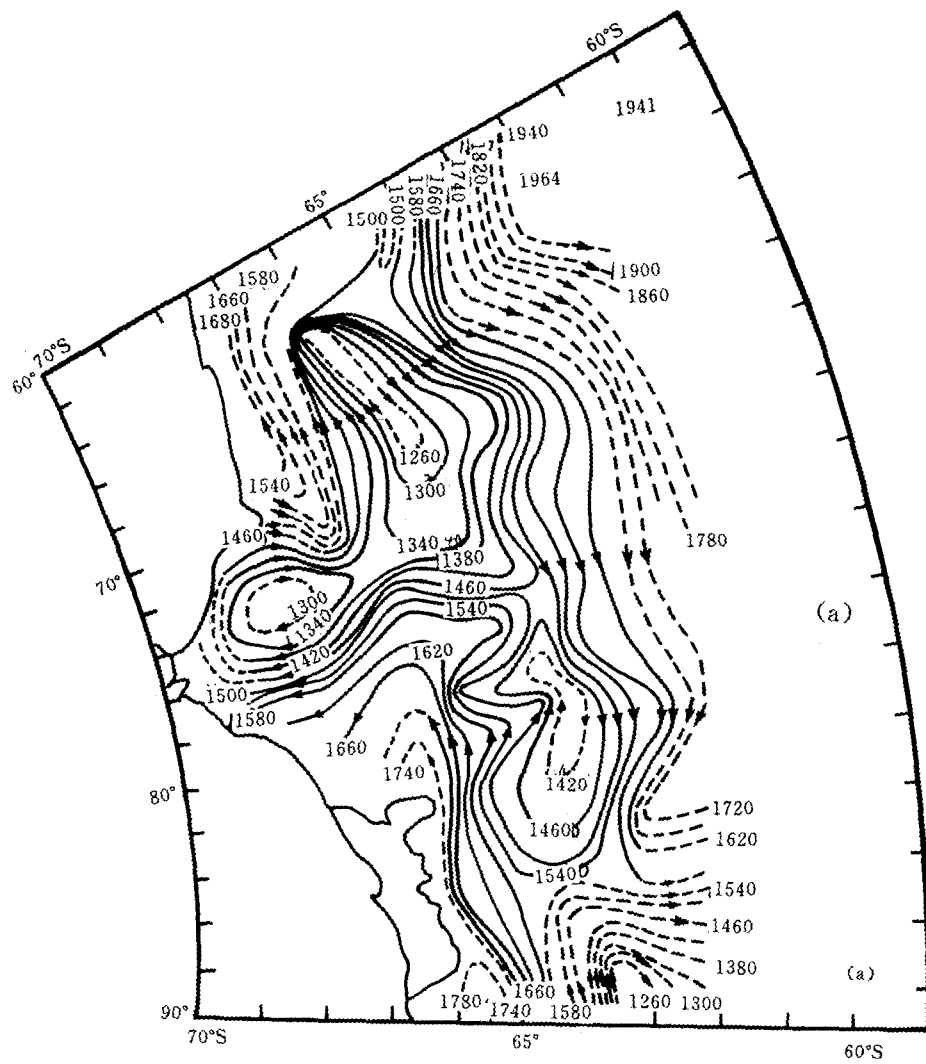
至于南极绕极流的时间变化,迄今为止的研究表明,其流速变化的最基本特征是天气尺度变化的周期占主要位置。谱分析结果表明,流速变化的主要周期有 2—3 日、4—6 日、14—17 日和大约 30 日(Саруханян и Смирнов, 1986)。显然,周期为 2—3 日的流速变化是与海上局地风场的变化密切相关的。在印度洋扇形区中,4—6 日的流速变化周期的存在也可从雪龙号首航气象资料中得到佐证。

## 2. 普里兹湾区环流的时空变化

为了考察普里兹湾区环流的时空变化,在图 5 中给出了不同年月普里兹湾区的海面动力高度分布图。为讨论方便起见,我们以图 5(a)为基点。图 5(a)是根据澳大利亚 FIBEX1(1981 年 1—3 月)的 CTD 资料给出的相对于 300m 的 50m 层的动力高度图( $10^{-4}\text{dyn m}$ , 引自 Smith *et al.*, 1984)。从图 5(a)可见:(1)在大致 63°S 以北,有一支宽阔的向东海流,显然,它是南极绕极流的一部分;(2)在辐散带以南,存在着一支并非连续的西向流,可以认为这是南极沿岸流的一部分;(3)在辐散带附近形成了两个较大的流涡,其中一个为顺时针的,另一个是反气旋式的;(4)在普里兹湾内存在着一个顺时针的环流;(5)在普里兹湾湾口处,可以看到,有一股冷水从西冰架流入普里兹湾,参与普里兹湾内的环流;另一方面,在艾麦里冰架附近,则有一股流从湾内流出而进入向西的南极沿岸流中。由此可以推测,在普里兹湾内,也应存在一支自东向西的沿岸流。

图 5(b), (c)是根据澳大利亚 ADBEX1(1982 年 11—12 月)和 SIBEX(1985 年 2—3 月)资料给出的动力高度图(引自 Middleton *et al.*, 1989)。从此两图可以看出,在辐散带以北,向东流动的南极绕极流在这一尺度上的变化并不很显著,但在沿岸区中的向西流动却有显著变化,尤其是流涡的变化更大,这就表明,南极辐散带的位置也是不断改变的。图 5(d), (e)是根据中国 CNARE-VI 和 CNARE-IX 的 CTD 资料画出的相对于 500m 的表层动力高度图。这两幅图不仅进一步证实了南极辐散带周围的流涡具有显著的时空变化,而且也表明南极沿岸流的时空变化与该海区上的低压带的移动有密切的关系。

由于南极辐散带是南极绕极流与南极沿岸流和有关的中尺度流涡相互作用的表征,因此在图 6 中根据 CNARE 资料给出了不同年份南极辐散带位置图。由图 6 可见,在中尺度的范围内,南极辐散带有显著的时空变化。



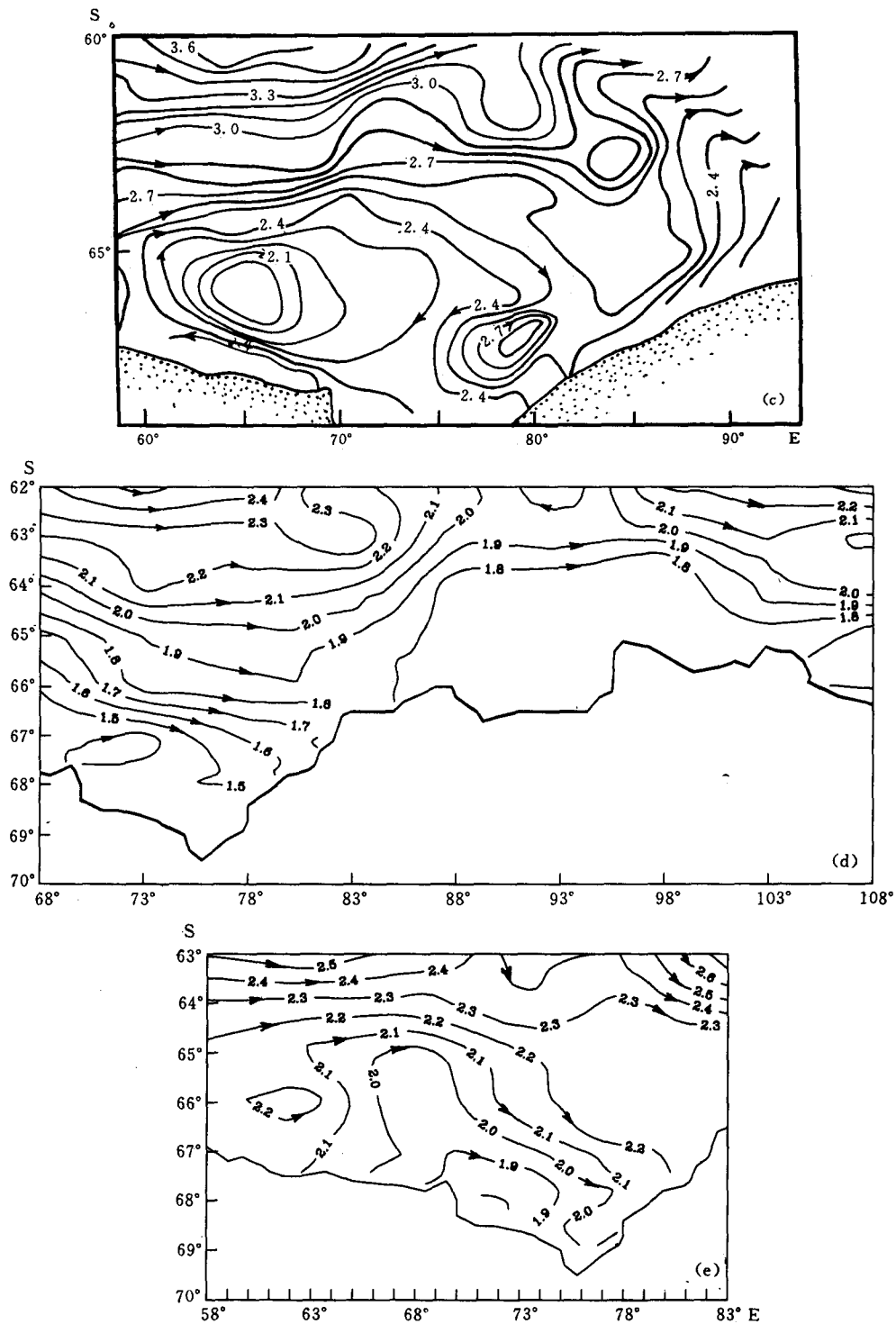


图5 普里兹湾区海面动力高度分布

(a) 50m 层相对于 300m 层分布( $10^{-4}$ 动力米); (b) 海面相对于 500m 层分布(动力米); (c) 海面相对于 600m 层分布(动力米); (d) 海面相对于 500m 层分布(动力米); (e) 海面相对于 500m 层分布(动力米)。

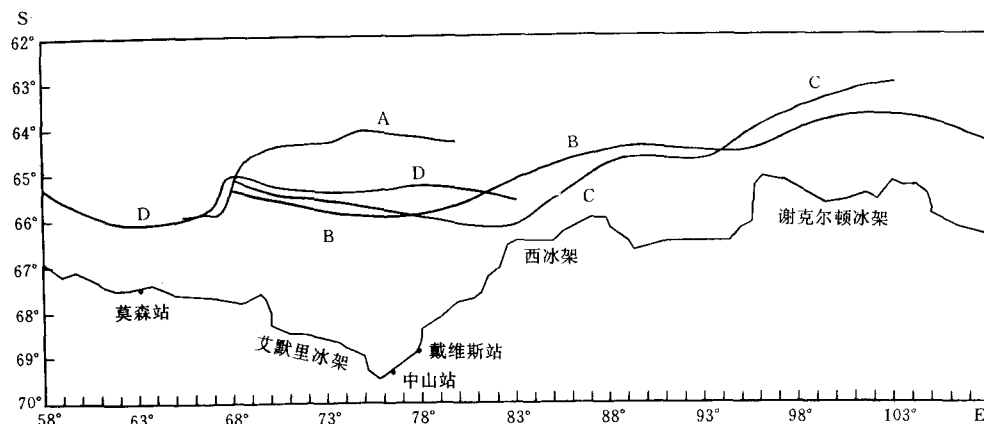


图6 研究区南极辐散线位置的年际变化

A. 1990年2月; B. 1991年1月; C. 1991年12月—1992年1月; D. 1993年1—2月

## 参 考 文 献

- 乐肯堂等, 1996, 普里兹湾区水团和热盐结构的分析, *海洋与湖沼*, **27**(3): 1—8。
- 乐肯堂, 史久新, 1997, 普里兹湾区环流与混合的研究, *海洋科学集刊*, **38**: 50—59。
- Allen, J. S., McCartney, M. S. and Yao J., 1975, Topographically-induced jets in a zonal channel with application to the Drake Passage (abstract), *Eos Trans. AGU*, **56**(12): 101.
- Bryden, H. L., 1983, The southern ocean, in: *Eddies in Marine Science* (edited by A. R. Robinson), Springer, New York, 265—277.
- Clifford, M. A., 1983, A descriptive study of the zonation of the Antarctic Circumpolar Current and its relation to wind stress and ice cover, M. S. thesis, 93 pp., Tex. A & M Univ., College Station.
- Deacon, G. E. R., 1977, Antarctic Water Masses and Circulation, In: *Polar Ocean* (edited by M. J. Dunbar), The Arctic Institute of North America, 11—16.
- Foster, T. D. and Carmack, E. C., 1976, Frontal zone mixing and Antarctic Bottom Water formation in the southern Weddell Sea, *Deep-Sea Research*, **27**: 367—381.
- Hofmann, E. E. and Whitworth, T., 1985, The large-scale horizontal structure of the ACC from FGGE drifters, *J. G. R.*, **90**(C4): 7084—7097.
- ISOS, 1981, DRAKE-79, The ISOS Experiment in the Drake Passage, Oregon State University, 1—139.
- Izvekov, M. V., 1959, Results of observation of currents in the region of the West Ice Shelf, *Soviet Antarctic Expedition*, **2**: 91—93.
- Joyce, T. M. and S. L. Patterson, 1977, Cyclonic ring formation at the polar front in the Drake Passage, *Nature* **265** (5590): 131—133.
- Klinck, J. M. and Hofmann, E. E., 1986, Deep-flow variability at Drake Passage, *J. Phys. Oceanogr.* **16**(7): 1281—1292.
- Kornilov, N. A., 1971, The fourteenth Soviet Antarctic Expedition, general description. Труды Советской Антарктической Экспедиции, **57**: 8—98.
- Middleton, J. H. and Humphries, S. E., 1989, Thermohaline structure and mixing in the region of Prydz Bay, *Deep Sea Res.* **36**(8): 1255—1266.

- Nowlin, W. D. , Jr. and Clifford, M. , 1982, The kinematic and thermohaline zonation of the Antarctic Circumpolar Current at Drake Passage, *J. Mar. Res.* , 40, suppl. , 481—507.
- Nowlin, W. D. , Jr. and Klinck, J. M. , 1986, The physics of the Antarctic Circumpolar Current, *Reviews of Geophysics* , 24(3): 469—491.
- Smith, N. R. , Dong, Z. , K. R. Kerry and S. Wright, 1984, Water masses and circulation in the region of Prydz Bay, Antarctic, *Deep Sea Res.* , 31(9): 1121—1147.
- Zverev, A. A. , 1959, Anomalous sea water temperature in Olaf Prytz Bay, *Soviet Antarctic Expedition* , 1: 269—271.
- Zverev, A. A. , 1963, Current in the Indian Sector of the Antarctic, *Soviet Antarctic Expedition* , 17: 144—155.
- Саруханян, Э. И. и Н. П. Смирнов, 1986, Водные Массы и Циркуляция Южного Океана, Гидрометеиздат, Ленинград, 15—276.

## **SOME THOUGHTS ON THE SPATIOTEMPORAL VARIATIONS OF WATER MASSES AND CIRCULATIONS IN THE REGION OF PRYDZ BAY, ANTARCTICA \***

Le Kentang, Shi Jiuxin, Yu Kangling, Chen Jinnian

(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences*)

### **ABSTRACT**

Hydrographical data from the Chinese National Antarctic Research Expedition (CNARE) from 1990 to 1993, were used in this study on some features of the interannual variations of water masses and circulations in the region of Prydz Bay, Antarctica. The results showed that in January, 1991 the Circumpolar Deep Water (CDW) could possibly intrude onto the continental shelfbreak and be mixed with a high salinity shelf water mass (HSSW); that the mixed water could produce the Prydz Bay Bottom Water (PBBW) within Prydz Bay as termed by Middleton et al. (1989); and that for the rest, PBBW could not be detected. It was also found that the distribution of the Antarctic Coastal Current and the location of the Antarctic Divergence in the region of Prydz Bay had significant spatiotemporal variability which caused some unstable eddies off Prydz Bay.

---

\* Contribution No. 3093 from the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.