

普里兹湾区水团和热盐结构的分析*

乐肯堂 史久新 于康玲

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

提要 普里兹湾陆架水能否下沉到800m 甚至更深而与上升的绕极深层水相混合并形成南极底层水, 迄今仍是一个悬而未决的问题。利用1989—1990和1990—1991 南极夏季在普里兹湾邻近海区“极地号”考察获得的温盐资料和有关的化学要素资料, 通过对考察区热盐结构和水团分布特性的分析, 发现高温、高盐的绕极深层水在某些情况下有可能扩展到普里兹湾陆架上。在观测期间的普里兹湾陆架上几乎不存在低盐陆架水, 而观测到的仅是高盐陆架水; 由于这种高盐陆架水的盐度在某些测站处已达到 $34.65 \times 10^{-3} (\sigma_t = 27.90)$, 因此, 这种较重的水已有可能沿着大陆坡下滑而达到800m 甚至更深而与上升的绕极深层水相混合。

关键词 热盐结构 高盐陆架水下沉 普里兹湾

普里兹湾(Prydz Bay)是南极大陆周围仅次于威德尔海和罗斯海的第三大海湾, 位于南大洋的印度洋扇形区。尽管自1957—1958 国际地球物理年以来, 国际上对于南印度洋的普里兹湾区的海洋考察研究逐渐增加, 并开展了若干次国际联合考察研究, 但与南大洋的其他扇形区相比, 印度洋扇形区的海洋观测和研究则少得多。至于对于普里兹湾区的海洋学研究工作, 则显得更少。进入80年代以来, 澳大利亚学者在执行BIOMASS (1981—1985) 计划期间, 对这一海区进行了若干航次的海洋学观测, 发表了若干研究结果。关于前人对普里兹湾区的水团和环流研究之结果, 可参见乐肯堂(1995)的述评。我国自1989年下半年起开始对普里兹湾区进行海洋考察。本文以中国第六次南极考察(CNARE-VI, 1989—1990)和第七次南极考察(CNARE-VII, 1990—1991)中所获得的温盐资料为基础, 结合有关化学要素资料, 对考察区水团分布特性进行分析。

1 资料

本文所用资料的站位, 即1990—1991 考察中印度洋测区的站位, 由图1所示。

CNARE-VI 的印度洋测区是在 62°S 以南至冰缘, $63^\circ\text{—}80^\circ\text{E}$ 的扇形区。其中, 普里兹湾内有6个测站, 湾外设4个断面28个测站, 合计34个测站。海上观测分4次进行: 1990年1月7—8日完成第I断面; 1月16—17日完成湾内6个站; 2月16—20

* 国家自然科学基金资助项目, 49376260号; 国家八五攻关资助项目, 905-02-01号。乐肯堂, 男, 出生于1939年9月, 研究员。

本文所用的资料由我国第六、七次南极考察队水文组、化学组提供, 谨此表示谢忱。

收稿日期: 1994年10月11日, 接受日期: 1995年9月5日。

日完成第Ⅱ、Ⅲ断面；3月2—3日完成第Ⅳ断面。CNARE-VII南大洋考察的海上观测工作于1990年12月28日—1991年1月11日一次完成。这次考察对大洋考察范围和站位设置作了适当调整，以便与BIOMASS计划的澳大利亚测区布站尽可能一致。测区的范围是从62°S起，南至冰缘，东西横跨40个经度(68°—108°E)，共9个断面。

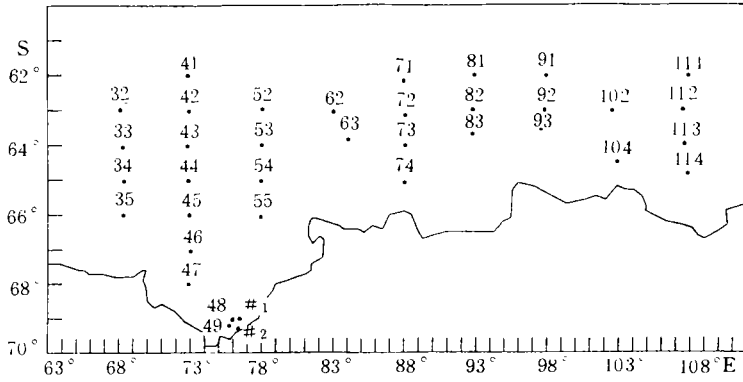


图1 CNARE-VII测区站位图

Fig.1 Station locations in the CNARE-VII survey

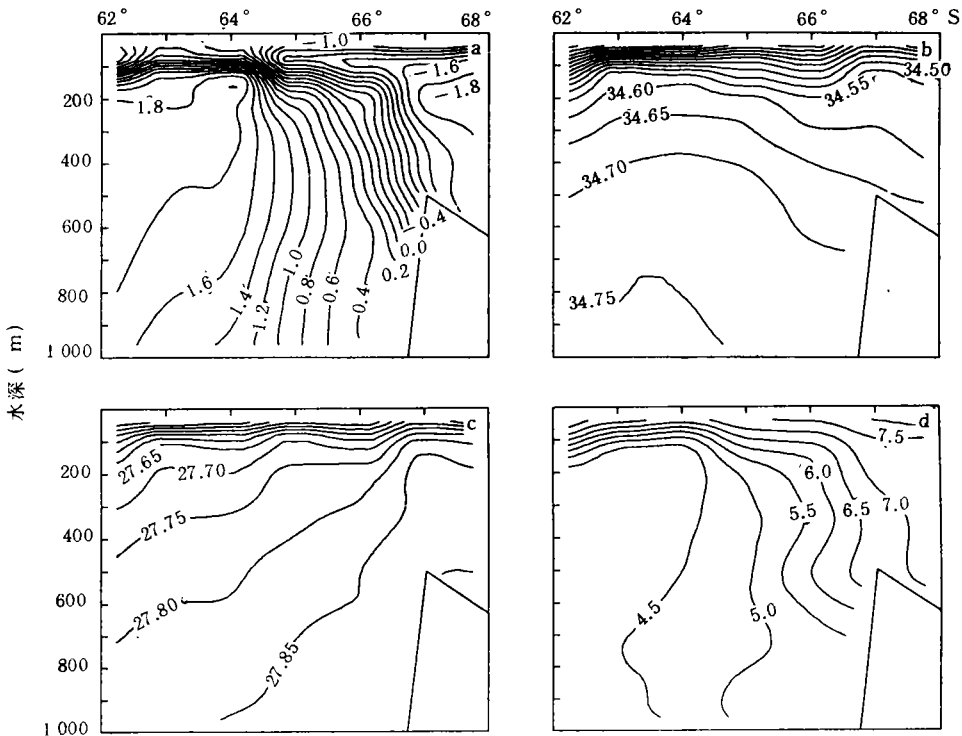


图2 沿经圈73°E的水文要素断面分布

Fig.2 Hydrographic sections along the 73°E longitude in the CNARE-VII survey

a. 水温(°C); b. 盐度($\times 10^{-3}$); c. σ_t ; d. 溶解氧(ml/L).

水温和盐度的观测用 Mark III CTD 进行。CTD 的最大观测深度为 1 000m。标准层次上的温度、盐度和 σ_t 之值是用样条插值方法获得的。化学要素的采样和测定均按“海洋调查规范”的要求进行，即溶解氧的测定用碘量滴定法，硅酸盐的测定用硅钼蓝法，而磷酸盐的测定则用磷钼蓝法。图 2 和图 3 分别给出了本测区各要素的断面分布 (CNARE- VII)。

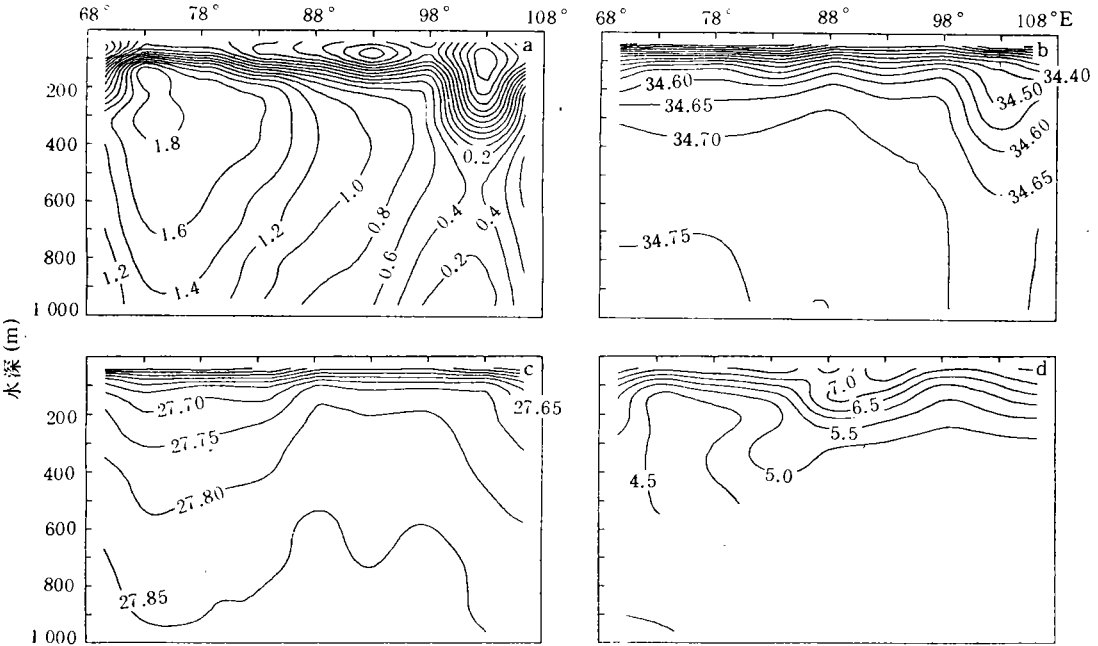


图 3 沿纬圈 64° S 的水文要素断面分布

Fig.3 Hydrographic sections along the 64° S latitude in the CNARE- VII survey

a. 水温(°C); b. 盐度($\times 10^{-3}$); c. σ_t ; d. 溶解氧(ml/L).

2 普里兹湾的热盐结构和水团分布

2.1 绕极深层水

绕极深层水(Circumpolar Deep Water, CDW)是普里兹湾区中体积最大的水团，其温、盐特征指标分别为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $34.50 \leq S \leq 34.75$ ¹⁾。

Gordon (1971a, b) 用水温最大值和盐度最大值作指标把绕极深层水分为上、下两层。水温最大值是深层水上层的标志，而盐度最大值则为深层水下层的标志。但正如图 2 所显示的，用 T_{\max} 作为核心层可以清楚地辨别出上深层水核心层所在的位置，以及深层暖水上升可达到的深度，但 S_{\max} 作为下深层水的核心标志则不甚明显，或许这是由于实测资料没有能达到 1 000m 以下的深层之故。

图 2 表明，在 41 站(62° S, 73° E)的 400—500m 处，水温已抵达 2°C，这一水温值不仅高于 CNARE- VI 的实测值，而且也高于在同一纬度处相近测站的实测值(Jacobs et al., 1977; Smith et al., 1984; Meddleton et al., 1989)。由于通常认为进入本测区的

1) Smith, et al. 1984, 将绕极深层水的特征指标确定为 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $34.50 \leq S \leq 34.75$ 。

深层水来自高温的北大西洋深层水(NADW)(Jacobs et al., 1977), 因此, 这一测站的 T_{\max} 值的上升意味着在 1991 年 1 月该深层水南进和上升的势头较强。事实上, 图 2 表明, 如按 0.5°C 作为深层水水温的上界, 则深层水可以南进至约 65.3°S , 上升至水深 80m。如以盐度指标($S=34.57$)作为其下界, 那么深层水可以南进到 67°S 以南。

至于溶解氧的分布, 在南极和亚南极区中, 一般说来, 深层水的上层附近将出现溶解氧的极小值。从图 2 可知, 表征深层水上升的溶解氧的极小值, 在 43 站的最小值为 4.07ml/L , 这一值出现在水深 150m 处。考虑到在 41 站处的最小值 4.05ml/L 出现于 329m 处, 由此可以推测, 这种情况似表明, 深层水由于南极陆架的隆起而上升到小于 200m 的深度上。Gordon(1967)¹⁾ 认为, 一般说来, 溶解氧极小值的位置位于水温极大值深度

之下, 比较图 3a 和图 3d 可以看出, 测区中溶解氧极小值与水温极大值之间相互的位置关系却较为复杂, 尤其在 64°S 以南区域。这可能是陆架区的影响。至于溶解氧的最小值分布与磷酸盐最大值分布, 也仅在深层水的上层区域呈现出大体一致, 在其他区域则难以表述。

Foster 等(1976)认为, 在南极底层水形成过程中, 绕极深层水能否上升并扩展到陆架上是一个关键因素。此外, 这后一过程还可能对浮冰的解冻起作用(Jacobs et al., 1970)。但 Smith 等(1984)的分析表明, 在 1981 年的资料中尚没有发现深层水扩展到普里兹湾区陆架上的证据。不过, Middleton 等(1989)的分析表明, 在 1982 年 11—12 月, 在普里兹湾陆架外缘已观测到一种混合水, 他们称之为普里兹湾底层水(PBBW), 其特性介于陆架水和

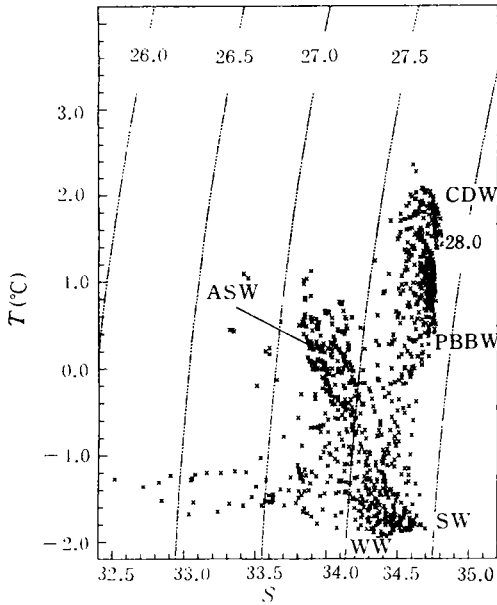


图 4 $T-S$ 图解
Fig.4 $T-S$ diagram

暖深层水之间。从 CNARE-VII 的 $T-S$ 图(图 4)上可以发现, 这种被称为普里湾底层水的混合水, 在某些测站(如 35, 45, 104, 114 站)中确有可能存在。但在 CNARE-VI 的 $T-S$ 图解上却没能发现它的存在。这就表明, 在某些年月, 绕极深层水是有可能扩展到普里兹湾区的陆架上的。

从图 3 可以看出, 在 64°S 的纬向断面上, 不同经度处深层水上升所达到的位置并不相同, 但只有位于普里兹湾正北面的深层水才有可能上升至 100m 以浅的深度。不仅如此, 由于受阻于弗拉姆浅滩(Fram Bank)和四女士浅滩(Four Ladies Bank), 只有在此两浅滩之间的深层水上升到深度 200m 以浅之后才有可能进入普里兹湾陆架上。而在四女士浅滩与 108°E 之间, 由于受到西冰架(West Ice Shelf)和谢克尔顿冰架(Shacklton

1) Gordon, A. L., 1967, Structure of Antarctic Waters between 20°W and 170°W , Antarctic Map Folio Series, 6, American Geographical Society (New York).

Ice Shelf) 的影响, 仅有小部分深层水才能达到 200m 以浅的深度。

2.2 表层水 根据 Mosby(1934) 的分类, 在南大洋中, 南极表层水 (ASW) 由于季节变化而可分为夏季表层水 (SSW) 和南极冬季表层水 (WW)。从图 2 和图 3 可以看出, 在 200 m 以浅的上层, 热盐结构具有下述特征: (1) 多数测站存在着两个温跃层, 其一是大致位于 100—200m 的水层上, 它标志着表层冷水和深层暖水的分界; 其二为季节性的温跃层, 大致位于 30—60m 的水层上。(2) 大多数测站的资料均显示出存在强烈的盐跃层, 其深度大致界于 40—80m 之间, 另有少数测站还显示出双盐跃层等复杂结构 (图 5); 大多数测站的密度垂直分布与盐度分布相似, 且密跃层的位置与盐跃层的位置基本一致。(3) 温、盐、密垂向结构的经向分布和纬向分布均具有明显的非均质性, 而且如把相应测站的温盐度垂直分布 (图 5 只是其中的几个例子) 与 Smith 等 (1984) 所给出的测站的分布相比较, 就可以发现两者之间已有明显的差异。由此表明, 普里兹湾区的热盐结构具有显著的季节变化和年际变化, 尤其在表层。考虑到上述温、盐、密分布的非均匀性与局地的地理条件和气象要素的变化密切相联, 故必须积累更多的更高质量的资料, 才能较清楚地了解其年际变化。

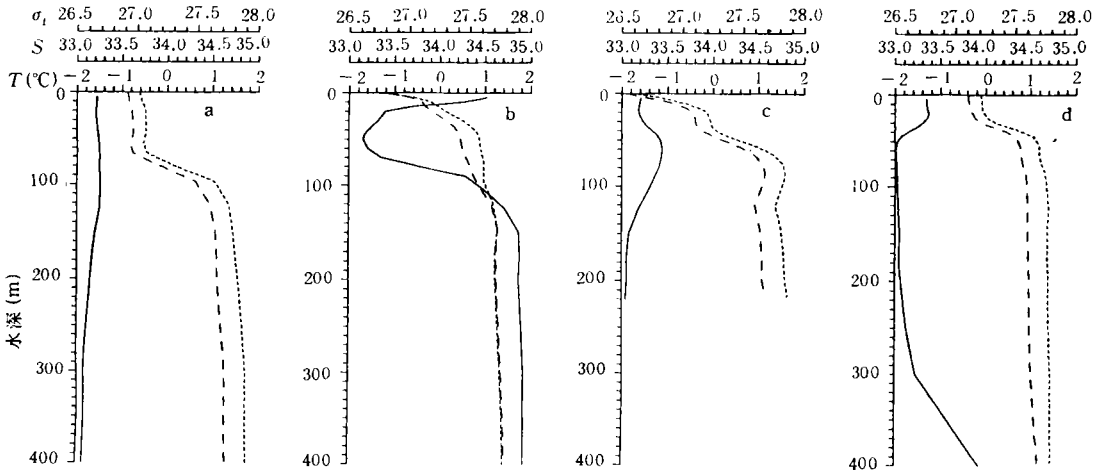


图 5 若干典型测站的水温、盐度和 σ_t 的垂向分布

Fig.5 Vertical distributions of temperature, salinity and σ_t at some stations in the Prydz Bay

- a. 站号 1, 1991 年 2 月 26 日; b. 站号 32, 1991 年 1 月 9 日;
c. 站号 49, 1991 年 1 月 19 日; d. 站号 104, 1990 年 12 月 30 日。

— T ; --- S ; ... σ_t 。

上述热盐结构分布的基本特征是本测区上层水团分布变化的表征。显然, 在夏季, 表层水位于季节跃层之上, 由于升温造成的海冰融化使夏季表层水具有低盐特征。从 $T-S$ 图解 (图 4) 可以看出, 它是一种过渡性质的水团, 没有显著的核心区。图 4 表明, 它的温度和盐度的特性指标似为 $-0.5 \leq T < 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $33.5 < S < 34.56$ 。一般而言, 表层水 (约位于 0—60m) 的厚度自北向南减小, 在普里兹湾海区的陆架上, 约为 30m。

图 2、图 3 和图 5 均显示出一个令人感兴趣的特征,即在夏季表层水和绕极深层水之间存在着一个低温水层。这一水层之水温极值(T_{\min})及其位置则随测站而变。图 2 和图 3 显示,多数站的 T_{\min} 值出现于 60—80m 的水层上,且其出现深度自南向北而减小。此外,图 2 还表明,在埃默里冰架(Amery Ice Shelf)附近, T_{\min} 甚至可以出现在 200m 附近。据认为这一低温水层是冬季对流的残存水(Mosby, 1934),即南极冬季水(WW)。Smith 等(1984)提出,在普里兹湾区,南极冬季水的温盐指标为 $T < -1.5^{\circ}$, $34.2 \leq S \leq 34.56$ 。从本测区的 $T-S$ 图(图 4)可以看出,上述指标仅能作为南极冬季水的核心部分之值。不过可以据此推测,在冬季,南极表层水有可能全为冬季水所占据,整个表层水的水温都可以低于 -1.5°C 。从图 3 可知,在多数测站,这一残存的冬季水之核心部分约位于 40—120m 的水层中。

关于南极冬季水可以残存于夏季表层水与绕极深层水之间的推测,也可以从溶解氧的垂向分布(图 2d)中获得佐证。在南大洋的极锋带以南的区域中,溶解氧分布的基本特征是由南向北递减和由上层向下层递减。值得注意的是,在测区中,相当多测站的溶解氧垂向分布在 50—100m 的水层中存在着一溶解氧极大值,尽管这一极大值的位置与上述的水温极小值的位置不尽相同,但我们认为它是残存的南极冬季水的表征。

2.3 陆架水 关于陆架水(SW)的示性指标,目前尚有不同的观点。Smith 等(1984)按照 Carmack(1977)的分析把陆架水分为两类:高盐陆架水和低盐陆架水。其温度指标为位温接近于 -1.8°C , 而其盐度指标则分别为大于 34.50 和小于 34.25。但 Middleton 等(1989)对 1982—1985 年的考察资料分析表明,陆架水的温盐特征指标则为 $T < -1.5^{\circ}\text{C}$, $S > 34.56$, 这就是说,实际上,他们并没有发现低盐陆架水。

从本测区的 $T-S$ 图(图 4)可以看出:(1)陆架水的水温特征指标似以 $T < -1.5^{\circ}\text{C}$ 为宜;(2)在 CNARE-VI 和 CNARE-VII 观测期间,除了靠近中山站的极小区域外,没有发现 $S < 34.25$ 的低盐陆架水;(3)高盐陆架水的盐度指标似取 $S > 34.50$ 为宜;(4)高盐陆架水主要存在于普里兹湾内及其以北(即弗拉姆浅滩与四女士浅滩之间)至 66°S 的海域内;(5)多数测站的高盐陆架水均位于 125—500m 之间,在有的站(如 46 站)上,陆架水可以在 80—450m 层上出现,而在有的站(48 站)上,其厚度可以达 590m(125—715m)。

2.4 底层水 Middleton 等(1989)在分析 ADBEX1 资料时发现,在普里兹湾内存在着盐度大于 34.56 的高盐陆架水,有时盐度甚至大于 34.62。他们认为,这种情况表明,此时陆架水的盐度已足够大,以致于使它可以沿着陆坡向下流动到邻近的绕极深层水之下而形成南极底层水。遗憾的是,迄今尚没有直接的证据表明,在邻接普里兹湾的陆架外存在着顺坡直接向下的流动。这种陆架水的异常高盐使 Middleton 等(1989)假设,它有可能与高温的绕极深层水发生混合。他们还把这种混合水称之为普里兹湾底层水(PBBW)。

问题在于实际上是否存在这种假设的 PBBW。他们的 $T-S$ 图解表明,在 ADBEX1 的 11 站(67.4°S , 63°E)的大陆坡上(水深 500—1500m)具有较重的水($T < 0^{\circ}\text{C}$, $S > 34.62$),由此支持了上述假设。尽管在 SIBEX, ADBEX1 和 ADBEX2 期间在深水中也观测到了具有上述特性的水,但由于它们的水深均超过了 1500m,故不能作为强对流的表征。

在图4上, 可以看到在35, 45和114各站的800—1000m和104站的500—1000m的水均具有上述特性。遗憾的是这几个站的CTD资料仅测到1000m。因此, 这些水有可能是Meddleton等(1989)所指的PBBW。值得注意的是, 在上述4个站中, 有两个站(35和45站)位于四女士浅滩以西, 而另两站(104和114站)则几乎位于谢克尔顿冰架以北。显然, 后两站已远离普里兹湾, 这种特性之水的来源或许与普里兹湾内流出的水没有直接的联系。但具有类似特性的前两站的水很可能与普里兹湾的高盐陆架水有直接的联系。上一节的分析已表明, 在46, 47, 48和49站的表层水之下均存在着盐度大于34.50的高盐陆架水。例如在46站, 这种高盐陆架水的深度已几乎到达底层(达450m), 且在450m层上(水深500m), 其盐度为34.65, 水温为 -1.51°C , $\sigma_t=27.90$ 。因此, 这一较重的水完全有可能沿大陆坡下滑而到达45站800m以下的水层。这一推测也可以从溶解氧的断面分布图(图2d)得到佐证。从图2d可以看出, 从46站(67°S)的400m层以下向北确实存在一个向下的溶解氧舌, 这表明, 有一股密度较大的陆架水向下滑动而与绕极深层水发生混合。

3 讨论和结果

普里兹湾海区底层水的形成问题, 一直是南大洋研究中悬而未决的问题, 主要困难是, 迄今没有得到本区的实测流场资料和直达底层的CTD剖面资料。我国“极地号”考察船在1989—1990和1990—1991的南极夏季对普里兹湾的邻近海区进行了海洋考察。尤其是1990—1991航次的考察, 获得了较高质量的CTD资料和有关的化学要素资料。本文利用这些资料, 研究了考察区的热盐结构和水团分布特性, 尤其是探讨了普里兹湾陆架水能否下沉到800m甚至更深处而与上升的南极绕极深层水相混合的问题。主要结果如下。

3.1 在1990—1991年的南极夏季在普里兹湾区的某些断面上, 发现了高温高盐的绕极深层水扩展到普里兹湾区陆架上的证据。

3.2 发现在普里兹湾区的表层水中, 多数测站存在着双温跃层, 有些测站还存在着双盐跃层, 由此表明, 在测区表层存在着季节性的不同水团的互侵。

3.3 发现本区中许多测站的热盐垂向分布与Smith等(1984)在相近测站上给出的分布有显著差异, 由此表明, 测区的热盐结构有显著的年际变化(Interleaving)。

3.4 发现在1990—1991的南极夏季, 在普里兹湾陆架的若干站上其800—1000m水层中的温盐指标具有Meddleton等(1989)所假设的普里兹湾底层水的特性, 由此表明, 在某些情况下, 这种水是有可能存在的。

3.5 在1990—1991观测期间的普里兹湾陆架上几乎不存在低盐陆架水, 而观测到的陆架水均属高盐陆架水。值得注意的是, 这种高盐陆架水的盐度在某些测站非常高, 已达到34.65($\sigma_t=27.90$)。因此在这些测站上, 这种较重的高盐陆架水已有可能沿着大陆坡下滑而达到800m甚到更深, 而与上升的绕极深层水相混合。

应当说, 由于本文所基于的CTD资料中深层次站的资料较少, 再加上缺乏直接的测流资料, 故尽管上述结果为解答底层水的形成提供了若干新的证据, 但要对此问题作出十分明确的回答, 仍有大量工作需要做。

参 考 文 献

- 乐肯堂, 1995. 海洋科学, 2: 26—30.
- Carmack, E. C., 1977. *Deep-Sea Research*, 24 (Supplement): 15—41.
- Foster, T. D. et al., 1976. *Deep-Sea Research*, 27: 367—381.
- Gordon, A. L., 1971a, Research in the Antarctic, ed. by Quan, L., American Association for the Advancement of Science (Washington D. C.), pp. 609—629.
- Gordon, A. L., 1971b, Antarctic oceanography I: Antarctic Research Series, ed. by Reid, K. L., Vol.15, American Geophysical Union, pp. 169—203.
- Jacobs, S. S. et al., 1970, *J. Geophys. Res.*, 17: 935—962.
- Jacobs, S. S. et al., 1977, *Deep-Sea Research*, 24 supplement): 43—84.
- Middleton, J. H. et al., 1989, *Deep-Sea Research*, 36 (8): 1255—1266.
- Mosby, H., 1934, Scientific Results of the Norwegian Antarctic Expeditions, 1927—1928, Vol.1, Oslo, pp.1—131.
- Smith, N. R. et al., 1984. *Deep-Sea Research*, 31 (9): 1121—1147.

AN ANALYSIS ON WATER MASSES AND THERMOHALINE STRUCTURES IN THE REGION OF PRYDZ BAY, ANTARCTICA

Le Kentang, Shi Jiuxin, Yu Kangling

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071)

Abstract Hydrographical and chemical data acquired by the Chinese Antarctic R/V “Jidi” in the Sixth (1989—1990) and Seventh (1990—1991) Cruises of the Chinese National Antarctic Research Expedition in austral summer in the region of Prydz Bay are used to analyze the thermohaline structure and the water mass distribution there. The main results from this study were as follows. (1) In some cases the Circumpolar Deep Water (CDW) could possibly intrude onto the continental shelf break off Prydz Bay; (2) In austral summer in the Prydz Bay region there were two thermoclines in most of the measured stations and two haloclines in some measured stations, whose locations and properties quite different from what were shown by Smith et al. (1984), and had some marked interannual variations in the thermohaline structure of the surface water; (3) A high salinity and density shelf water mass (SW) existed in the unique continental shelf water in the region during the cruises, where salinity could reach 34.65×10^{-3} ($\sigma_t = 27.90$) in some stations, a possibility for the high salinity SW to go down the continental slope.

Key words Thermohaline structure Sinking of high-salinity continental shelf water Prydz Bay