

研究论文

2011/2012 年夏季南极半岛北端周边海域的水团与水交换

史久新 孙永明 矫玉田 郝光华 王妙

(中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

摘要 通过分析中国第 28 次南极科学考察队于 2011 年 12 月至 2012 年 1 月在南极半岛北端周边海域获得的 5 条断面观测温盐剖面数据, 进一步认识了该海域的水团组成和水交换情况。观测区域南部的鲍威尔海盆及周边深海区, 可以观测到保持了较显著高温核心的威德尔深层水、密度大于 $28.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的威德尔海深层水以及温度低于 -0.7°C 的威德尔海底层水。周边陆坡上的威德尔深层水则表现出因与周围水体发生混合而核心性质减弱的特征。在菲利普海岭、埃斯佩里兹海槽等复杂地形处, 观测到的对应于威德尔深层水深度的混合与热盐入侵过程更为显著。威德尔深层水能够到达南设得兰群岛以北的象岛东北面海域, 但是高盐核心加深至 1 500 db, 上覆的温暖水体温度基本不变, 但盐度随深度显著增大, 表明威德尔深层水经历了不同的路径和变性过程。布兰斯菲尔德海峡中没有绕极深层水大规模侵入的迹象, 但是乔治王岛周边陆架上可能存在涡旋等中尺度过程, 会影响德雷克海峡与布兰斯菲尔德海峡之间的水交换。

关键词 水团 环流 南极半岛 南设得兰群岛 南奥克尼海台

doi: 10.13679/j.jdyj.2016.1.067

0 引言

南极半岛北端周边海域指的是南极半岛北端及其向东延伸出去的南设得兰群岛 (South Shetland Islands) 和南奥克尼群岛 (South Orkney Island) 周边海域, 即斯科舍海 (Scotia Sea) 与威德尔海之间的海域。该海域基本上可以分为西部、中部和东部三段: (1) 西部突出海面的是南设得兰群岛和南极半岛的北端 (包括周边的若干岛屿), 夹在两者之间的是布兰斯菲尔德海峡 (Bransfield Strait); 该海域北接德雷克海峡, 南为威德尔海的西北部陆架区; 南设得兰群岛由 20 多个大小不同的岛屿组成, 从南至北, 较大的岛有: 象 (Elephant) 岛、克拉伦斯 (Clarence) 岛、

乔治王 (King George) 岛、纳尔逊 (Nelson) 岛、罗伯特 (Robert) 岛、格林威治 (Greenwich) 岛、利文斯顿 (Livingston) 岛、斯诺 (Snow) 岛、史密斯 (Smith) 岛、欺骗 (Deception) 岛、低 (Low) 岛 (又译为洛岛); (2) 中部海域完全在海面以下, 南部为鲍威尔海盆 (Powell Basin), 水深超过 3 000 m; 其北面为两条近乎平行的海岭, 即南斯科舍海岭和菲利普海岭 (Philip Ridge), 两条海岭之间是埃斯佩里兹海槽 (Hesperides Trough); 鲍威尔海盆的西南侧为茹安维尔海岭 (Joinville Ridge); (3) 东部为南奥克尼海台, 海台的大部分区域水深小于 500 m, 北部有很小的区域高出海面, 成为南奥克尼群岛; 海台的西侧和东侧各有一条水深超过 1 000 m 的通道, 即菲利浦通道 (Philip Passage) 和奥克尼通道。

[收稿日期] 2014 年 11 月收到来稿, 2014 年 12 月收到修改稿

[基金项目] 国家海洋局“南北极环境综合考察与评估”专项项目 (CHINARE2014-01-01, CHINARE2014-04-01) 资助

[作者简介] 史久新, 男, 1969 年生, 教授, 主要从事极地物理海洋学研究。E-mail: shijuxin@ouc.edu.cn

由于南奥克尼海台周边海域是威德尔海与斯科舍海水团交汇的地方,该海域也被称为威德尔-斯科舍汇流区(Confluence)^[1]。实际上,这一海域的水交换,尤其是深层的水交换基本上是单向的,即只有从威德尔海向斯科舍海和德雷克海峡的北向输运^[2-3]。威德尔海是南极底层水(AABW, Antarctic Bottom Water)的主要源地之一,但是受海底地形所限,在威德尔海西南部陆架附近生成的威德尔海底层水(WSBW, Weddell Sea Bottom Water)在向北流动至接近汇流区时,只能随着气旋式的威德尔流涡(Weddell Gyre)继续向东移动,并不能进入斯科舍海^[2,4]。只有相对低盐的威德尔海深层水(WSDW, Weddell Sea Deep Water, 温度在 $-0.7\sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间)^[2]能够进入鲍威尔海盆,进而绕过南奥克尼海台向北进入斯科舍海^[5]。相对WSBW而言,WSDW具有低盐和高溶解氧的特征,是由于其中包含了来自南极半岛北端东侧的威德尔海陆架水^[2]。这个位置的陆架水也有一部分绕过茹安维尔海岭向北输运,进入布兰斯菲尔德海峡的深层和底层^[6]。水团性质的分析表明,布兰斯菲尔德海峡东海盆和中央海盆的深层水和底层水基本上来源于威德尔海,太平洋水仅有可能对中央海盆有极少量的贡献^[7]。实际上,来自太平洋的绕极深层水(CDW, Circumpolar Deep Water)仅对布兰斯菲尔德海峡的西部和南部有影响,海峡的中部和东部似乎不存在CDW,或者其影响相当弱^[8]。在海峡的西端,CDW可以出现在靠近南极半岛一侧的陆架上^[9-10],也可以通过南设得兰群岛链中的一些水道进入海峡。史密斯岛与斯诺岛之间500—600 m深的通道是主要的入流通道^[8,9,11-12],这些水体仅在布兰斯菲尔德海峡北侧流动,进而流出海峡,并未进入中央海盆^[10]。史密斯岛与布拉班特(Brabant)岛之间的陆架较浅(400—500 m),间或有CDW从此处侵入海峡^[9-10]。在乔治王岛与象岛之间(400—600 m深),动力计算的结果显示,有一流速较大、流向较为稳定的东向流动进入海峡^[8];但是,也有研究认为这里是布兰斯菲尔德水的主要输出口^[12]。总之,由于地形的阻挡,来自太平洋的CDW不能穿过南设得兰群岛之间的水道,直接进入威德尔海的西北部,而是先随着南极绕极流(ACC, Antarctic Circumpolar Current)穿越德雷克海峡,然后一部分进入气旋式的威德尔流涡,从东

部进入威德尔海,再流经威德尔海南部,最终到达南极半岛以东的威德尔海西部海域。经过长途输运,CDW的高温特征已经有所减弱,但仍是威德尔海中温度最高的水团,称为威德尔深层水(WDW, Weddell Deep Water),亦称为暖深层水(WDW, Warm Deep Water)^[3,13]。WDW进而能够进入鲍威尔海盆通过菲利普通道以及埃斯佩里兹海槽进入南斯科舍海岭北侧^[14],或者经奥克尼通道绕过南奥克尼海台,也能够到达南设得兰群岛以北的海域^[2]。

综上所述,由于海底地形的变化多端和多支流动的交汇,南极半岛北端周边海域的流场和水交换过程呈现非常复杂的图景^[13],其中的一些细节有待进一步厘清。

南极半岛北端周边海域是早期中国南极考察队的重点海洋调查区域。1985年1—2月,中国首次南极考察队,开展了以南设得兰群岛周围海域和别林斯高晋海东北部海区为重点的综合海洋调查,完成了34个站位的CTD观测以及更多测点的XBT观测。利用上述实测数据,分析了夏季水团和环流的基本特征^[8]以及锋面的结构^[15]。中国第3次南极考察队于1987年1—2月,对南设得兰群岛海域进行了调查,完成了28个站位的作业。之后,中国南大洋调查和研究的重点区域移到普里兹湾海区,在近25年的时间里未曾开展南极半岛周边海域的系统观测。2011年12月至2012年1月,中国第28次南极科学考察队搭乘“雪龙”号破冰船再次进入南极半岛北端周边海域,完成了5个断面的综合海洋调查。本文利用此次调查获得的温盐数据,分析该海域的水团组成与性质,并探讨威德尔海与斯科舍海之间的水交换,以期获得对该海域水文状况的全面认识,并为其他学科的研究提供参考。

1 观测和数据采集

中国第28次南极科学考察队于2011年底至2012年1月完成5条断面的海洋学观测(图1)。在2011年12月30—31日仅完成了D5断面中间的3个站(D5-03、D5-04和D5-05),其余断面的观测则是集中在2012年1月的下半月完成的,具体观测日期见表1。其中,D1、D3和D4断面分别是在2—3 d内完成的,观测的同步性更好。

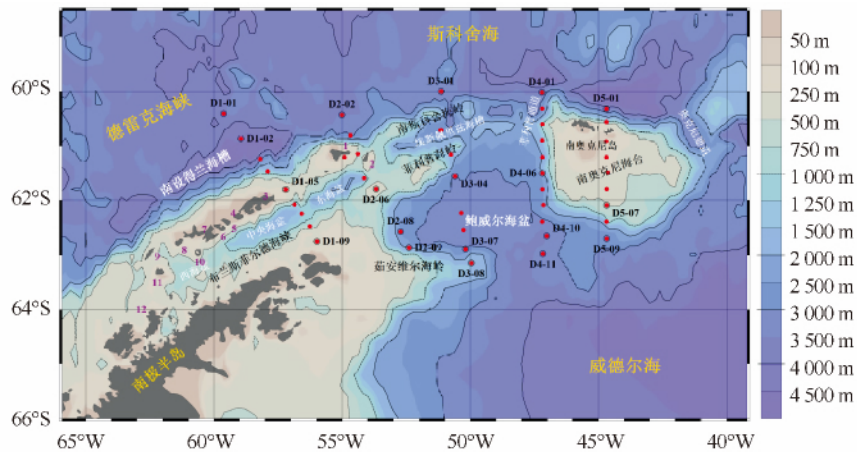


图 1 南极半岛北端周边海域地形 (等深线为 500、1 000、2 000、3 000 和 4 000 m) 及第 28 次南极科学考察的海洋观测站位 (红点)。图中紫色数字代表以下岛屿: (1) 象岛; (2) 克拉伦斯岛; (3) 乔治王岛; (4) 纳尔逊岛; (5) 罗伯特岛; (6) 格林威治岛; (7) 利文斯顿岛; (8) 斯诺岛; (9) 史密斯岛; (10) 欺骗岛; (11) 低岛; (12) 布拉班特岛

Fig. 1. Map of the region around the northern tip of Antarctic Peninsula showing bathymetry (depth contours of 500, 1 000, 2 000, 3 000 and 4 000 m) and oceanographic observation stations (red dots) of the 28th Chinese National Research Expedition. The purple numbers indicate following island names: (1) Elephant; (2) Clarence; (3) King George; (4) Nelson; (5) Robert; (6) Greenwich; (7) Livingston; (8) Snow; (9) Smith; (10) Deception; (11) Low; (12) Brabant

温盐观测主要是停船下放 CTD, 在风浪较大的站位则以投放 XCTD 代替, 总计完成了 42 站的 CTD 观测和 3 站的 XCTD 观测。观测用的 CTD 是 SBE9plus 型, 配有两套温度、电导率和溶解氧传感器, 其中美国哥伦比亚大学提供的一套传感器作为主传感器(primary), “雪龙”号原有传感器作为第二传感器。这两套传感器均在航次前后送往原厂进行了校准。校准结果表明, 哥伦比亚大学提供的电导率传感器有较显著的时间漂移, 因而本文采用雪龙船原有传感器所获得的数据。按照标准程序经过处理(包括时间漂移订正)后, 观测数据完全达到 SBE9plus 型 CTD 的标称精度, 即温度为 0.001℃, 电导率为 0.000 3 S · m⁻¹。作为抛弃式设备, XCTD 的精度较低, 温度为 0.02℃, 电导率为 0.003 S · m⁻¹。

表 1 CTD 和 XCTD 观测日期
Table 1. Observing date of the CTD and XCTD

日期	CTD 观测站	XCTD 观测站
2011 年 12 月 30—31 日	D5-03—D5-05	
2012 年 1 月 16—17 日	D1-03—D1-09	D1-01、D1-02
2012 年 1 月 18—21 日	D2-08、D2-04	D2-07、D2-09
2012 年 1 月 22—23 日	D2-06—D2-02	
2012 年 1 月 24—26 日	D3-01—D3-08	
2012 年 1 月 26—28 日	D4-12—D4-01	
2012 年 1 月 28—29 日	D5-01、D5-02、D5-06—D5-08	

利用本次调查所获得的 CTD 数据, 计算了位势温度 (θ , 以压强 $P = 0$ 为参考面)、盐度 (S)、中性密度 (γ_n) 等变量。除非特别指出, 本文以下所述温度和密度均是指位势温度和中性密度。

另外, 由于海冰对海洋表层的温盐结构有重要影响, 本文还利用了同期的卫星遥感 SSMIS 海冰密集度数据, 选取本次 CTD 观测的第 1 天、最后 1 天和中间 1 天的数据, 绘于图 2。

2 水团划分

根据以往研究结果, 总结了该海区的主要水团及对应的温盐等特征(表 2)。南大洋南极区的表层水通常被称为南极表层水(AASW, Antarctic Surface Water), 包括南极夏季表层水(AASSW, Antarctic Summer Surface Water)和冬季水(WW, Winter Water)。本文为了简便并强调其季节性特征, 将南极夏季表层水简称为夏季表层水(SSW, Summer Surface Water)并进一步细分为斯科舍海夏季表层水(SSWs)与威德尔海夏季表层水(SSWw)两个子水团。冬季水也有同样的细分, 主要是由于调查区域包含了斯科舍海与威德尔海两个海域, 而两者的温盐性质差别显著。深层水和底层水的划分在引言中已有所介绍, 在此不再赘述。

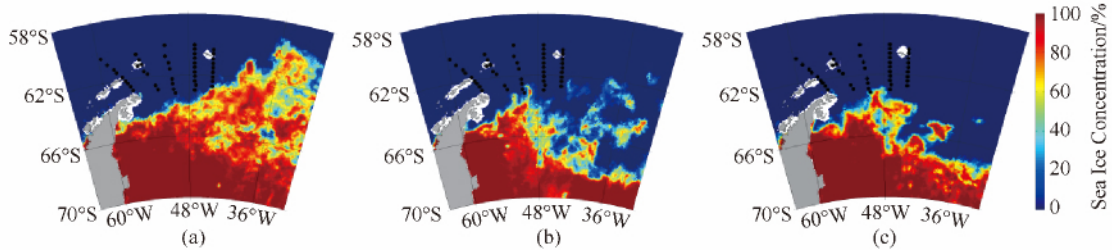


图 2 观测期间的海冰密集度(%)分布。(a) 2011 年 12 月 30 日; (b) 2012 年 1 月 16 日; (c) 2012 年 1 月 29 日。图中的黑色圆点为 CTD 和 XCTD 观测站位

Fig. 2. Sea ice concentration (%) on (a) December 30, 2011; (b) January 16, 2012; (c) January 29, 2012. CTD and XCTD observing stations are indicated by black dots

表 2 主要水团及特征
Table 2. Characteristics of main water masses

水团名称 (英文缩写)	子水团	$\theta/^\circ\text{C}$	S	$\gamma_n/(kg \cdot m^{-3})$
夏季表层水 (SSW)	斯科舍海 (SSW _s)			
	威德尔海 (SSW _w)			
冬季水 (WW)	斯科舍海 (WW _s)	表层极小值		
	威德尔海 (WW _w)			
绕极深层水 (CDW)	上(UCDW)	极大值	极大值	27.95—28.27
	下(LCDW)			
威德尔深层水 (WDW)		极大值		28.1—28.27
威德尔海深层水 (WSDW)		-0.7—0		>28.27
威德尔海底层水 (WSBW)		<-0.7		>28.27
布兰斯菲尔德 海峡底层水 (BSBW)	中央海盆 (BSBW _c)	~-1.6		~34.57
	东海盆 (BSBW _e)	~-1.0		~34.56

用本次调查的所有 CTD 和 XCTD 观测数据绘制 θ - S 图(图 3),并在各水团的核心位置标注水团的名称,可以得到对该海域水团温盐性质的一个总体认识。

3 断面水团分析

本节将基于每一个断面的温度、盐度和密度分布图以及断面上所有站点的温度和盐度垂向廓线图以及 θ - S 图(为方便计,每个断面的图为一组,见图 4-8),分析热盐特征和水团结构。

3.1 D1 断面

D1 断面几乎与布兰斯菲尔德海峡垂直,且从中央海盆的最东侧穿过(图 4d)。海峡中的几个测站

中,只有 D1-07 站观测到 500 m 以深(图 4e),在海底附近,1 000 db 上下有一个明显的温度跃变,温度从 980 db 处的 -0.63°C 变为 1 010 db 处的 -1.39°C (图 4a),盐度随深度增加略微减小,由 34.56 降至 34.54,虽然变化幅度只有 0.02,但是这与极地海洋通常的变化趋势相反(图 4b)。这部分水体的温盐性质虽然更加接近东海盆底层水(BSBW_e),但是由于 D1-07 站位于中央海盆的东边缘,此处并不是中

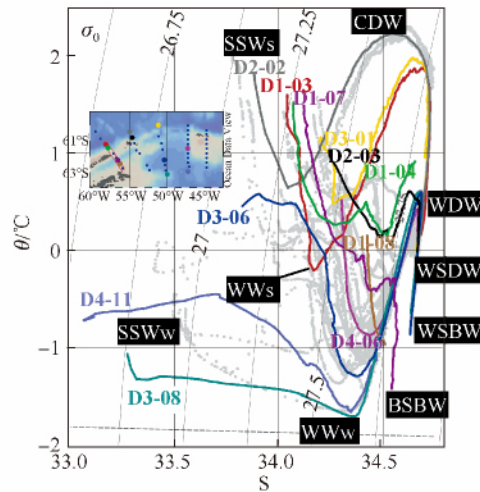


图 3 利用本次调查所有温盐数据绘制的 θ - S 图,其中彩色线为代表性站位(在内嵌的地形图中用同样颜色标记)上的 θ - S 曲线,灰色点为其他站位上的数据。灰色等值线为位势密度 $\sigma_0/(kg \cdot m^{-3})$,灰色虚线为海面处的冰点。水团的名称标记在水团核心附近

Fig. 3. θ - S diagram of all hydrographic data in this cruise. Several typical θ - S curves are plotted in different colours and their geographical locations are shown in the embadded map by a dot with the same colours. The other data are indicated by gray dots in the θ - S diagram. The gray contours and a gray dashed line indicate potential density $\sigma_0/kg \cdot m^{-3}$ and freezing points at sea surface respectively. The names of main water masses are also shown in the θ - S diagram near the cores of the water masses

央海盆的最深处,这部分水体还应该看作中央海盆底层水(BSBWc)。图 4e 南侧的地形不够精确,D1-08 站的实测水深只有 336 m,而 CTD 投放到 332 db,已接近海底。如此一来,D1-08 站上,从 120 db 直到海底,都是垂向比较均匀的水体(温度在 $-0.87 \sim -0.96^{\circ}\text{C}$,盐度在 34.47—34.51),与 D1-09 站 80 db 至海底的水体性质非常接近,从较好的垂向均一性来看,这部分水体可以归为陆架水;但是,其最低温度高于 -1°C ,远高于冰点(图 3),与保持冬季低温特征的陆架水还是有所区别。综上所述,低温是 D1 断面南部的首要特征,除了 D1-03 站上少量的冬季水之外,其他温度低于 0°C 的水体均集中于此,最冷的水均位于底层,分别在茹安维尔岛以北的陆架和布兰斯菲尔德海峡。

D1 断面北部则体现出南大洋南极区的典型水

团特征^[8],从上至下依次为南极夏季表层水(SSWs)、冬季水(WW)和绕极深层水(CDW)。最显著的是以温度极大值为特征的 UCDW,其最高温度达 2.29°C (D1-01 站,图 4a)。最北端的两个测站均是 XCTD 观测结果,给出的 CDW 温盐特征比较一致,只是其高温核心所在深度从北至南有所抬升,从 440 db 变为 290 db(图 4e)。D1-03 站为 CTD 观测,虽然仍存在温度极大值,但是温度已降至 1.89°C (在 340 db 附近,图 4a),而对应的盐度则有所增大(图 4b),相对的低温和高盐使其密度大于北侧的 CDW(图 c 和 e),说明两者不是同一来源。D1-03 站的 CDW 不是从其北侧的 D1-02 站而来,是另外一个 CDW 的低温高盐分支。D1-03 站的盐度廓线(图 4b)显示,中层的盐度较大(380—2 000 db, $S > 34.70$; 600—1 200 db, $S > 34.72$)。这部分水体可能

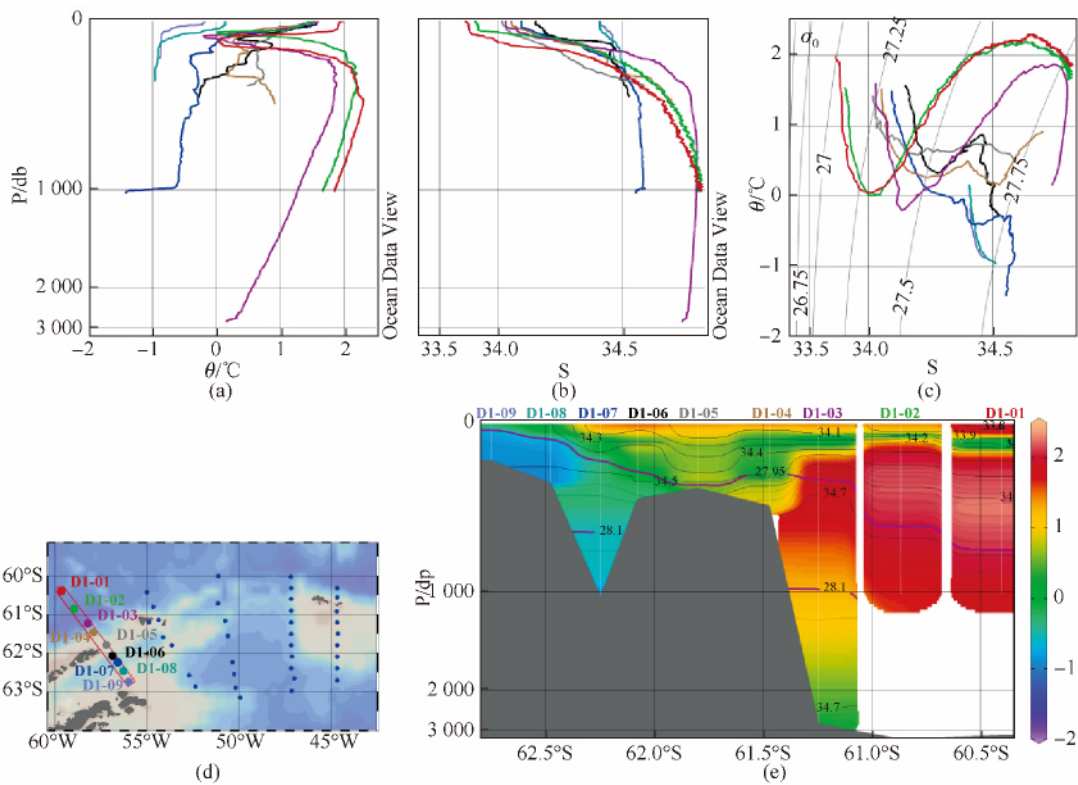


图 4 图 4(a) D1 断面的温度垂向廓线图; (b) 盐度垂向廓线图; (c) θ - S 图; (d) 站位图; (e) 温度、盐度和密度断面图。其中 (a)、(b) 和 (c) 中的线条颜色对应于 (d) 中的站位标记颜色。(e) 中的色标为温度,黑色等值线为盐度(实线的间隔为 0.1,虚线的间隔为 0.02),紫色等值线为密度(自上而下依次为 27.75 、 28.1 和 $28.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。白色细直线表示数据的位置,为了更细致地显示上层海洋和高盐部分的变化,图中的压强和盐度坐标采用了非线性变化

Fig. 4. (a) Vertical profiles of temperature; (b) salinity; (c) θ - S diagram; (d) station map; (e) distribution of temperature, salinity and density in section D1. The colours of curves in (a), (b) and (c) are responsible to the colours of station dots in (d). The colour scale, black contours, purple contours and white lines indicate temperature, salinity (with intervals of 0.1 for solid contours, 0.02 for dashed contours), density (27.75 , 28.1 and $28.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ from top to bottom) and data position. Non-linear coordinate of pressure and salinity are used in order to present more details of upper ocean and high salinity

是以盐度极大值为表征的 LCDW。在 CDW 与较暖的 SSWs 之间,是低温的 WW,以垂向断面中的温度极小值为特征(图 4e),D1-03 站的 WW 最低温度为 -0.21°C ,D1-01 站和 D1-02 站的最低温度则略高于 0°C ,分别为 0.05 和 0.01°C (图 4a)。由于 CDW 的抬升,D1-02 站 WW 厚度较小,温度低于 0.5°C 的水层厚度只有 25 m 左右,而其南北两侧站位的同一水层厚度均在 60 m 左右(图 4a)。

断面中部的 3 个站位,温度垂向廓线的共同特点是呈现锯齿形(图 4a),即高低温交替出现,说明这一区域是冷暖水交汇的地方。其中,D1-05 站的温度相对较高,110 db 以深的温度垂向变化很小,温度限于 $0.6\text{--}0.8^{\circ}\text{C}$ 之间。D1-06 站的 130 db 附近出现一块温度接近 0.9°C 的孤立暖水(图 4a 和 4e),从 $\theta\text{-}S$ 图(图 4c)上看,这块暖水与 D1-03 站的 CDW 与 WW 之间的过渡水体的性质接近,其盐度明显高于相邻站位同深度水层的盐度(图 4b 和 e),从上下等密面($\gamma = 27.85\text{--}27.9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)的起伏呈现凸透镜形状(图略)来推断,这一厚度有限的暖水

很可能是一个暖核的反气旋式(逆时针方向)涡旋。D1-04 站 $60\text{--}300\text{ db}$ 之间为 $0.15\text{--}0.5^{\circ}\text{C}$ 的冷水,这一深厚的冷水与其北侧站位上的 CDW 之间形成强温度梯度,即南极陆坡锋或陆缘水边界。这一冷水团似乎被 165 db 处的略暖水体分为两部分(图 4a 和 c);在 300 db 以深则逐渐变暖,性质介于 CDW 和 WDW 之间(图 3)。

3.2 D2 断面

D2 断面南端位于鲍威尔海盆西侧(图 5d),这里仅有一个 CTD 测站(D2-08)和一个 XCTD 测站(D2-09)。这两个测站上的 130 db 附近均存在温度极低的冬季水(WW),其核心最低温度分别为 -1.05 和 -1.50°C (图 5a)。600 db 附近的暖水是这两个测站温度廓线上的另外一个显著特征,D2-08 站上的温度略高,为 0.56°C 。从暖水的温度和中性密度指标看,应该是源自威德尔海的 WDW(图 5e)。

北端的 D2-02 站的水团构成与 D1 断面北端站位上的相同,尤其是 UCDW 的核心温度和所在深度与 D1-02 站非常一致(图 5e);只是 WWs 已显著减

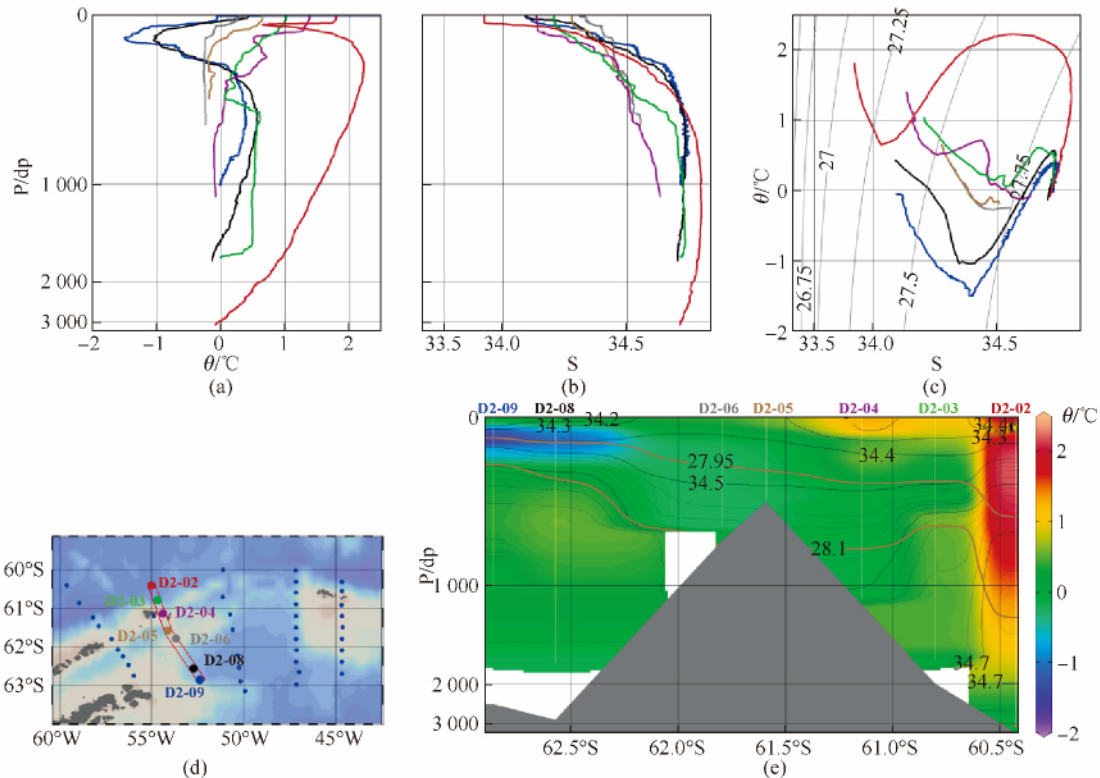


图 5 (a) D2 断面的温度垂向廓线图; (b) 盐度垂向廓线图; (c) $\theta\text{-}S$ 图; (d) 站位图; (e) 温度、盐度和密度断面图. 设置与图 4 相同

Fig. 5. (a) Vertical profiles of temperature; (b) salinity; (c) $\theta\text{-}S$ diagram; (d) station map; (e) distribution of temperature, salinity and density in section D2. Settings are the same as that of Fig. 4

弱,虽然仍然表现为温度极小值,但是最低温度已升至 0.64°C (图 5a)。与 D1 断面最北端的两个 XCTD 测站不同, D2-02 站是 CTD 观测,能够观测到深层较为明显的盐度极大值 (800—1690 db, $S > 37.72$, 图 5b),因而该测站上显示出 UCDW/LCDW 的完整配置形式(图 5e)。D2-03 站上,在 630—1530 db 之间是垂向比较均一的水体,温度在 $0.48\text{—}0.55^{\circ}\text{C}$ (图 5a),盐度在 $34.65\text{—}34.68$ (图 5b),密度在 $28.12\text{—}28.18\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 5e),其性质与鲍威尔海盆中的 WDW 接近,但又有明显的差别(图 5c)。D2-03 站与 D2-08 站在 600db 附近都出现了温度极大值,两者的温度很接近,但是盐度相差 0.05。

D2 断面中部的 3 个站位没有特别的温盐结构,基本上是暖而薄的夏季表层水和冷且深厚的陆架水的组合(图 5e)。其中, D2-04 站的上层温度廓线形状略微复杂(图 5a),体现出象岛这一突出地形的作用。

3.3 D3 断面

D3 断面的南半部分穿过鲍威尔海盆(图 6d),

断面图上最突出的就是位于 500 db 上下的 WDW,有两个高温核心(图 6e),分别位于 D3-05 站和 D3-08 站,最高温度均为 0.59°C (图 6a);而两者之间站位上观测到的温度极大值略低。这一分布形式,似乎表明 WDW 可能从鲍威尔海盆的南端(D3-08 站)流入,而从海盆的偏北部流向东。断面盐度分布图(图 6e)上显示,WDW 的盐度也较高,但是其高盐核心($S = 34.68$)要比高温核心深,在 600 db 上下。D3-04 是鲍威尔海盆北部的一个测站,在 600 db 有一个很微弱的暖而咸水体 (0.20°C , 34.64 , 图 6a 和 b),似乎是已经变性的 WDW(图 6c)。以上测站的 1800 db 以深都出现了密度超过 $28.27\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的水(图 6e)。根据 Gordon 等^[2]提出的判据,这些水体以 $\theta = -0.7^{\circ}\text{C}$ 为界,进一步分为深层水(WSDW)和底层水(WBW),其中后者均出现在 3000 db 以深(图 6a)。断面南半部分的表层则是夏季表层水与冬季水的标准配置(图 6a 和 6b)。D3 断面最南端的 D3-08 站还观测到了本次调查获得的最低温度 (-1.70°C , $P = 95\text{ db}$, 图 6a 和 6c, 图 3);这里接近

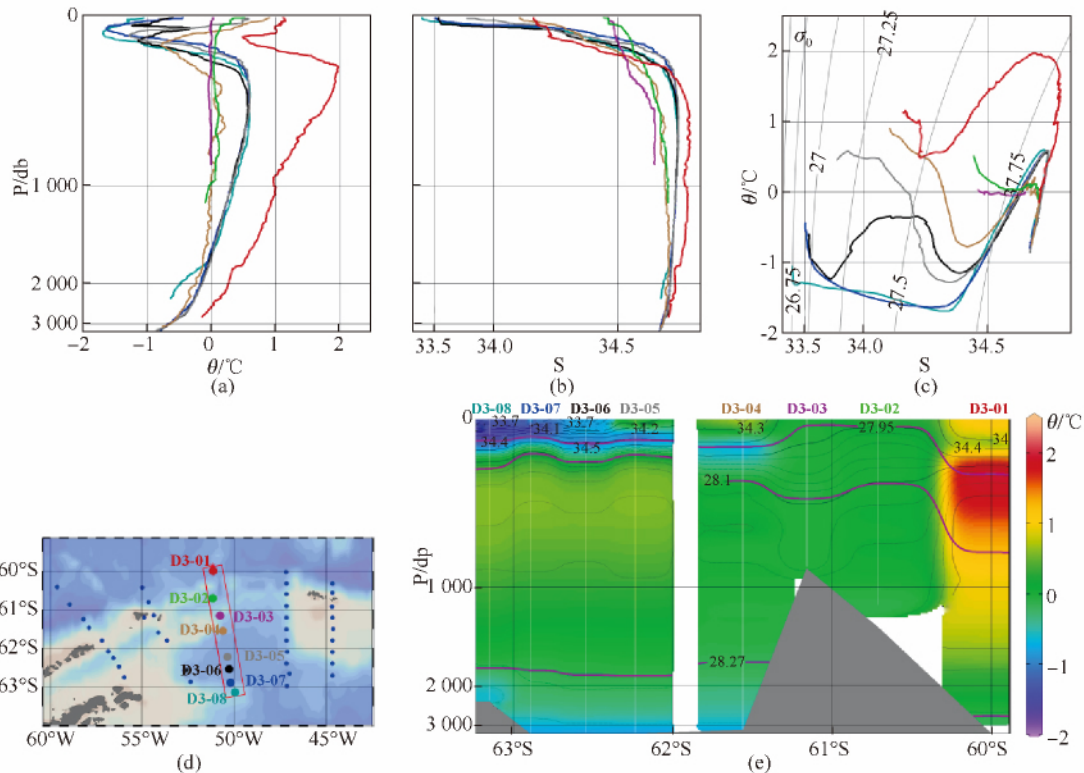


图 6 (a) D3 断面的温度垂向廓线图; (b) 盐度垂向廓线图; (c) θ -S 图; (d) 站位图; (e) 温度、盐度和密度断面图. 设置与图 4 相同

Fig. 6. (a) Vertical profiles of temperature; (b) salinity; (c) θ -S diagram; (d) station map; (e) distribution of temperature, salinity and density in section D3. Settings are the same as that of Fig. 4

海冰边缘(图 2), 次表层的冬季低温特征得以较好地保留下来; 表层的盐度只有 33.25(图 6b 和 6e), 这一低盐特征是海冰融化注入的淡水形成的。

D3 断面最北端的 D3-01 站的水团构成, 与 D2 断面北端测站基本一致, 只是 UCDW 和 LCDW 的核心温度和盐度略低。温盐垂向廓线(图 6a 和 b)上, 在 955 db 存在温度和盐度极小值(0.96°C, 34.70), 将 LCDW 分成了上下两部分。

D3-03 站上, 从表层到深层, 温度几无变化, 保持在 0°C(图 6a), 只是盐度略有增加(图 6b); 到了 510 db 以深, 盐度也保持在 34.61, 没有变化, 形成一个厚达 300 m 的温盐均一层(图 6a、6b 和 6e)。该站位于菲利普海岭的东端, 这样的垂向温盐结构, 表明海岭上的水柱垂向稳定性很弱, 可能有较强的垂向混合。D3-02 站的垂向温盐变化也不显著, 只是表层略微暖而淡, 400 db 以深, 温度略升高且有变化(图 6a), 从 θ -S 图上看, 这部分似乎受到 WDW 的影响。以往在 D3 断面东侧的 50°W 上, 曾观测到显著的 WDW^[14, 16], 因此 D3-02 站可能是埃斯佩里兹海槽中的 WDW 西边界。

3.4 D4 断面

D4 断面最南端的 D4-11 站观测到本次调查的最小盐度值 33.07, 出现在表层(图 7b 和 7e、图 3), 也是由于海冰融化造成的(图 2); 该站次表层同样也有非常冷的冬季水(WWw), 最低温度为 -1.66°C, 出现在 $P = 104$ db 处(图 7a), 为本次调查中观测到的最低温度(图 3)。该站实际已经在威德尔海南部, 观测到的 400 db 处暖水应该是 WDW, 核心温度高达 0.61°C(图 7a); 同样, 盐度的高值区也是出现在高温核心的下方(图 7e), 且在很厚的一个层次中几乎没有变化(34.69, $P = 480-550$ db, 图 7b)。从该站以北的 3 个测站上, 都可以识别出 WDW, 只是暖而咸的特性越来越弱(图 7e)。D4 断面南端的 3 个测站都观测到了密度大于 $28.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的 WS-DW, 在约 1800 db 以深(图 7e)。只有在 D4-09 站上, CTD 下放到接近海底的深度, 观测到了温度低于 -0.7°C 的 WSBW(图 7a 和 7e)。

D4 断面的中部和北部沿着南奥克尼海台的西侧(图 7d), 从上至下, 基本上是 SSW/WW/WDW 的水团构成, 没有特别的温盐结构(图 7e)。

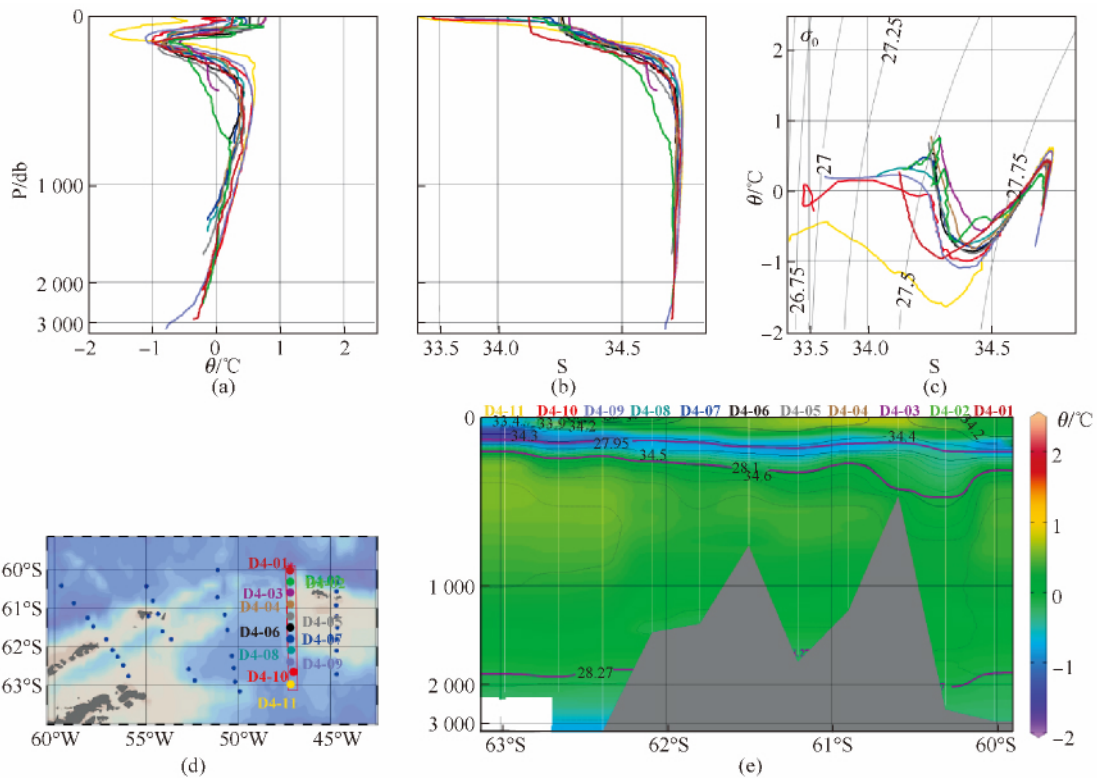


图 7 (a) D4 断面的温度垂向廓线图; (b) 盐度垂向廓线图; (c) θ -S 图; (d) 站位图; (e) 温度、盐度和密度断面图。设置与图 4 相同
Fig. 7. (a) Vertical profiles of temperature; (b) salinity; (c) θ -S diagram; (d) station map; (e) distribution of temperature, salinity and density in section D4. Settings are the same as that of Fig. 4

3.5 D5 断面

最东侧的这个断面沿着 44.7°W 经线,纵贯南奥克尼海台(图 8d),但是观测的时间同步性不好(表 1),中间的 D5-03、D5-04 和 D5-05 站的观测时间,比其它站早了 1 个月。这 3 个站上有较厚且冷的冬季水,低温核心在 145 db 左右,最低温度出现在 D5-03 站,为 -1.34°C(图 8a)。3 个站的水深在 220—350 m 之间,在这样的浅水区域,并没有出现深达海底的低温陆架水(图 8e),说明此处秋冬季因结冰而造成的混合深度局限在 150 m 左右。在此深度之下,温度和盐度均逐渐增大(图 8a 和 b),其性质趋向于 WDW(图 8e),表明 WDW 上部的水体能够爬升到海台之上。以往在 44°W 以东的海台底层,曾观测到温度低于 0°C 的 WSDW^[2]。而在本次

观测的 44.7°W 断面上,显然并不存在这样的底层冷水。

D5 断面的最高温度出现在南端,达 0.54°C,出现在 D5-09 站的 390—460 db,这是 WDW 的核心部分。WDW 中的高盐部分出现在较深的层次,且在很大深度范围内几无变化,在 400—900 db 之间,近 500 m 厚的水体盐度均为 34.68。断面北端测站 D5-01 观测到的最暖部分也应该是 WDW(图 8c),其最高温度为 0.49°C,出现在 470 db;另外一个较弱的暖核为 0.44°C,在 670 db(图 8a、8e)。这里的 WDW 比南端的 WDW 温度低,按照以往的研究结论^[2]这里应该是威德尔海中的 WDW 绕过南奥克尼海台流出的部分。

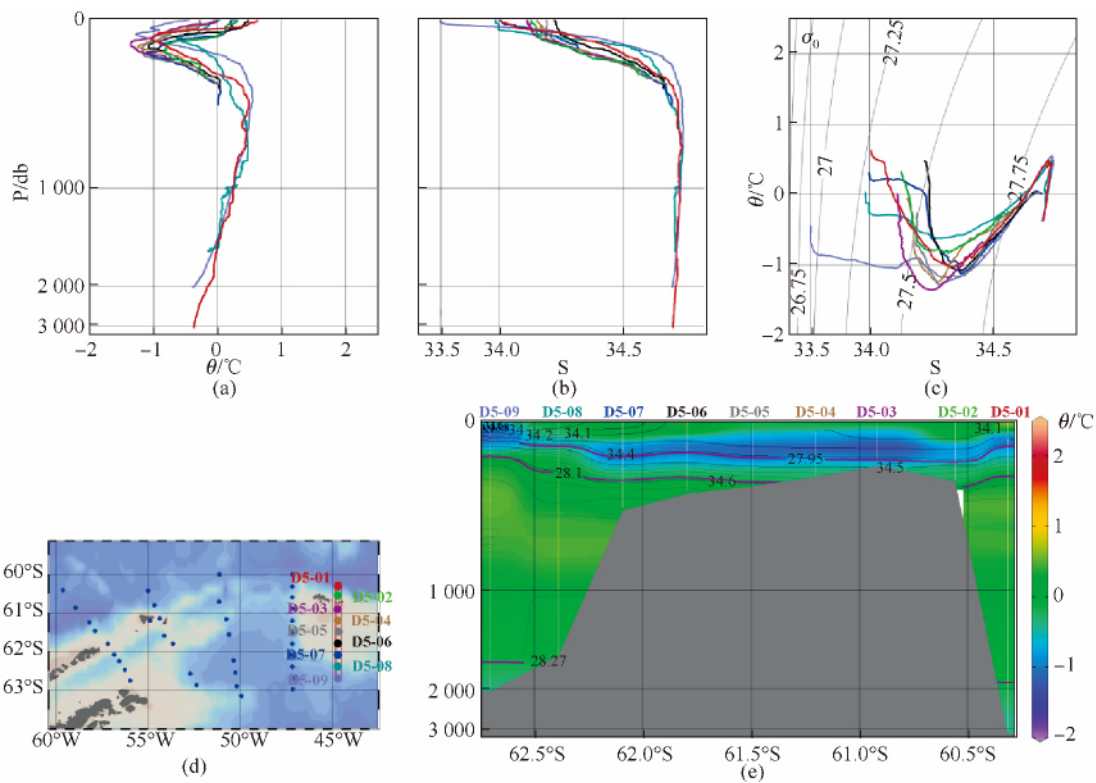


图 8 (a) D5 断面的温度垂向廓线图; (b) 盐度垂向廓线图; (c) θ -S 图; (d) 站位图; (e) 温度、盐度和密度断面图。设置与图 4 相同

Fig. 8. (a) Vertical profiles of temperature; (b) salinity; (c) θ -S diagram; (d) station map; (e) distribution of temperature, salinity and density in section D5. Settings are the same as that of Fig. 4.

4 水交换的讨论

本次调查断面的基本走向是南北方向,断面之间的距离较大,无法构成沿着纬圈方向的、介于斯科

舍海与威德尔海之间的断面,因而不宜直接分析这两个海域之间的水交换。本文的水交换分析,是基于以往研究对该海域环流的基本认识,结合上述水团分析结果而开展的。

由于本次调查没有乔治王岛至象岛之间的断

面,难以给出布兰斯菲尔德海峡与德雷克海峡之间的水交换情况。从 D1 断面的观测结果来看,布兰斯菲尔德海峡的东部确实没有 CDW 侵入的迹象。但是,乔治王岛以东海域复杂的温盐结构(图 4)表明这一区域存在中小尺度的混合与交换过程,除了前文提到的 D1-06 站 130 db 处可能存在反气旋式暖涡之外,在 D1-04 站和 D1-05 站上都有一些小尺度的特殊结构。由于观测站位的空间分辨率有限,目前尚不能进行深入的分析。

除了 D1 断面之外,在其他断面的深水测站,都观测到了 WDW。我们选取了具有代表性的一些站位,绘出其温盐垂向廓线图和 θ - S 图(图 9)。从这些图(特别是图 9d)上可以看出,该海域的 WDW 可以分为两类:(1)有着明显的高温和高盐核心($\theta > 0.5^\circ\text{C}$, $S > 34.68$),温盐廓线也较为光滑,出现在 D3、D4 和 D5 断面南部的站位上(在图 9c 中用三角形标记的站位,如 D3-05 和 D4-11 站),即威德尔海北部和鲍威尔海盆中部。之前的观点认为 WDW 的高盐核心与高温核心是近乎重合的^[2]。从温度和盐度的垂向廓线图(图 9a 和 9b)上看,这两者所处深度还是有约 100 m 的差别。由于 WDW 实际上是 CDW 的残余,其高温核心与高盐核心的这种上下配置形态,应该源自 CDW 中 UCDW(以温度极大值为特征)与 LCDW(以盐度极大值为特征的)的配置形态;(2)高温高盐核心性质明显减弱且位置变深,说明已经与周围水体发生了混合,出现在各个陆坡上,包括鲍威尔海盆西侧(D2-08 站)和南奥克尼海台周边(在图 9c 中用圆形标记的站位)。还有一些温盐性质接近 WDW 的水体,主要出现在南斯科舍海岭和菲利普海岭周边,包括 D3-02、D3-04 和 D4-02 站(在图 9c 中用正方形标记的站位),其突出的特征是温盐廓线及 θ - S 线呈现明显的锯齿形,表明这个层次出现了热盐入侵(thermohaline intrusion),这通常是一个水团的核心遇到与其温盐性质差异很大的周边水体时发生的现象,这里可能是 WDW 的边缘。D2-03 站在图 9 中显得非常特殊,尤其是 800 db 以深的温度廓线(图 9a)以及出现在 1 500 db 的盐度极大值(34.68,图 9b)与其他站上的廓线明显不同。在 θ - S 图上,1 000—1 500 db 的这部分水体(图 9d 中 B 点与 C 点之间的部分)的温盐性质与南奥克尼海台周边的 WDW(即上述第 2 类 WDW)相同(图 9d),只不过其高盐核心所在层次加深了近 1 000 m

(图 9b 中的 B 点)。2008 年 1 月在此处也观测到了相似性质的水体,Palmer 等^[14]认为此处的 WDW 包含两类,一类来自奥克尼通道,一类来自埃斯佩里兹海槽,前者的密度小于后者。从本次观测的结果看,B 点与 C 点之间的水体符合上述来自埃斯佩里兹海槽的 WDW 特征;但是本次观测在该海槽中仅有 D3-02 站,水深只有 1 300 m,观测不到加深的 WDW,因而无法进一步讨论两者之间的联系。对于 D2-03 站出现的 WDW 大幅度加深,以往的文献均没有做出解释。我们猜测位于埃斯佩里兹海槽与 D2-03 站所处位置之间的南斯科舍海岭起到了重要的作用,该海岭的存在将其南北两侧海域分离开来,在低于海岭的下层海洋部分可以存在较大的温盐及密度的南北差别。从 D2 断面的情况看,就是在同一深度上,海岭北侧的海水密度小于南侧(图 5e)。当埃斯佩里兹海槽一侧的 WDW 翻过南斯科舍海岭后,由于海岭北侧同深度的密度较小,WDW 就会潜入更深层次。当然,这只是一种基于现有数据和认识的推测,还需要将来有更充分的观测事实加以证明。在 WDW 核心之上的暖而淡的水体(A 点与 B 点之间,570—1 000 db)是 D2-03 站独有的(图 9d),其温盐性质与其他站位的 WDW 有显著差别。具体来看 A 点上的温度极大值接近鲍威尔海盆中的 WDW(即上述第一类 WDW)的温度极大值,但是盐度却低至 34.62。这一温盐特征的形成令人费解,如果将这一低盐属性归因于 WDW 与上层低温低盐水体的混合,又无法解释高温特征的维持。还有一种可能是其高温特征来自于 CDW,即有来自其北侧的水团加入。A 点这一温度极大值(570 db)对应的密度为 $28.08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,而 D2-02 站上直至 1 100 db 才能达到这一密度,即两站之间密度为 $28.08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的层次相差约 500 m,不可能进行沿等密度面的混合。如此大的深度差在密度断面图中体现为等密面的大坡度倾斜(图 5e),表明这里有强的锋面和急流。当然,我们无法排除 CDW 在 D2 断面之外的其他地点已经加入。从 D2 断面图(图 5e)上看,570—1 000 db 之间的水体,更像是来自于垂直于断面方向的输入,而非沿着断面的水体的混合。也就是说,在 D2 断面观测到的 WDW 及其上的高温水团,不太可能是局地形成的,而是沿着陆坡输运而来。在 A 点之上的低盐低温水体,其温度极小值(0.06°C)出现在 450 db(图 5a)。与此温盐性质相

似的水体还出现在 D1-04 站(图 3 和图 4),也是位于高温水之上;另外,在 D2-04 站的深层也是此类水体。这些水体像是属于南设得兰群岛周边海域的同一个水团,从其低温的性质来看,应该是陆架水。总之,基于目前站位较为稀疏的观测数据,尚难以厘清南斯科舍海岭周边的水团变性过程和水交换路径,将来应该设计有针对性的观测站位,并开展长期观测,才能真正解决这一问题。

相应地,深层水除了标准的 WSDW(D3-05 站、D3-06 站、D3-07 站、D4-09 站、D4-10 站和 D4-11 站),也有不同的情况。从图 9 来看,在 1 500—2 500 db 之间,有 3 个站出现了明显较为冷而淡的水体。其中,只有 D3-04 站位于水深超过 3 000 db 的海盆中,按照以往的研究结果^[2],该站上这部分水体属于更多通风(better ventilated)的 vWSDW。

而在另外两个站上,这部分水体实际是出现在底层。D3-08 站位于茹安维尔海岭的东端,1 650 db 以浅的水层与其北部站位上的结构完全一致,而在此深度直至海底,温度和盐度急剧降低,使温盐垂向廓线出现明显的转折,说明底层的这部分水体是从外面侵入的,从其冷而淡的性质上看,很可能源自茹安维尔岛周边的陆架水。这部分水体可被看做是 vWS-DW 的一个极端类型(extreme form)^[2],与 WSDW 混合形成了 vWSDW。D5-09 站在南奥克尼海台南侧,该站从 200 db 至海底(2 000 db)都较上下游的站冷而淡,体现出南奥克尼海台海台上的通风过程。

D5-01 站在 1 880—2 380 db 之间的温盐廓线及 θ -S 曲线与鲍威尔海盆中央的站位(D3-05 站和 D3-06 站)上的几乎完全贴合(图 9a、9b 和 9d),说明这部分水体为 WSDW; WSDW 从威德尔海北侧绕过南

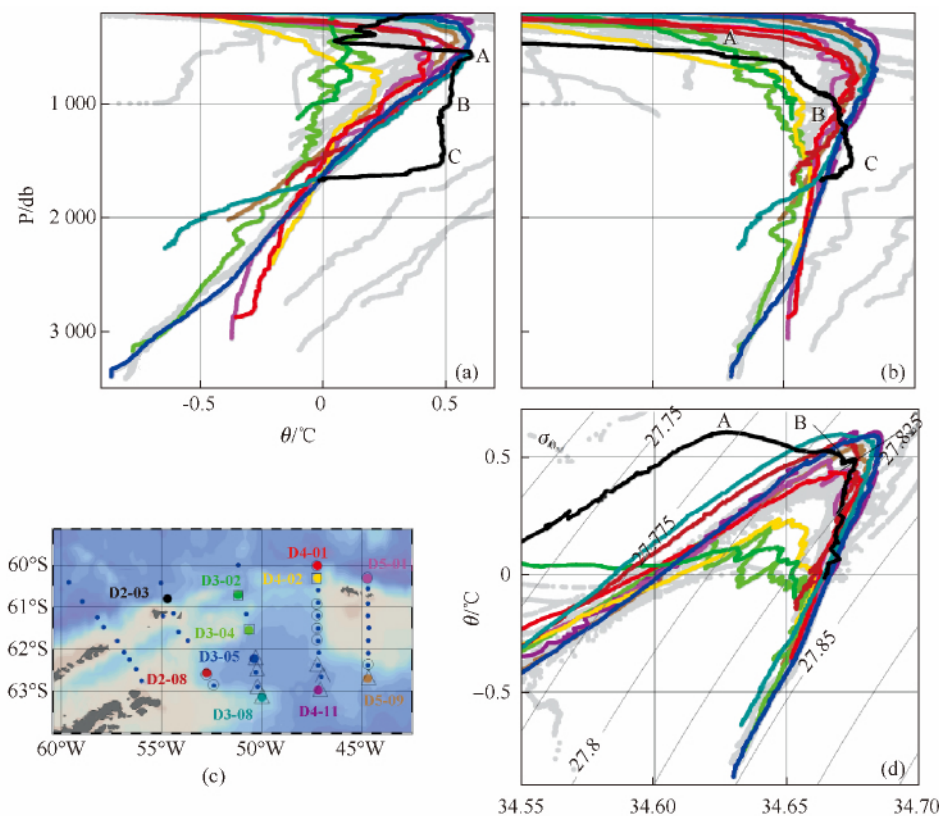


图 9 用于分析 WDW 的 (a) 温度垂向廓线图; (b) 盐度垂向廓线图; (c) 站位图; (d) θ -S 图。(c) 中的三角形表示出现 WDW 的站位,圆形表示有出现轻微变性 WDW 的站位,正方形表示出现明显热盐入侵的站位。(a)、(b) 和 (d) 中的彩色线的颜色对应于 (c) 中站位点的颜色,灰色散点为其他站位上的数据。A、B 和 C 点分别表示 D2-03 站深层的温度极大值、1 000 db 处的拐点和盐度极大值

Fig. 9. (a) Vertical profiles of temperature; (b) salinity; (c) station map; (d) θ -S diagram for analysis of WDW. Triangles, circles and squares in (c) indicate stations with WDW, slightly modified WDW and obvious thermal intrusion, respectively. Colour of curves in (a), (b) and (d) are responsible to colours of station dots in (c), and gray dots indicate data at the other stations. A, B and C indicate the temperature maximum, 1000 db and the salinity maximum respectively

奥克尼海台运移至此,仍保留了较为完整的特性。2 380 db以深的温盐性质则明显不同于 WSBW,说明 WSBW 没有进入南奥克尼海台以北的海域,这与之前的认识一致^[2]。在上层(300—1 800 db),虽然仍有对应于 WDW 的温度和盐度极大值,但是温盐廓线已呈现明显的锯齿形,说明已有周围其他水体侵入。

本次调查中共有 4 个站(D3-05 站、D3-06 站、D3-07 站和 D4-09 站)观测到了温度低于 -0.7°C 的 WSBW,都在鲍威尔海盆中。这些出现在威德尔海较浅水域(本次观测站位最大水深为 3 400 m)的 WSBW 是其中较多通风的部分,也被称为 vWSBW^[2]。

5 结论

利用中国第 28 次南极科学考察队于 2011 年 12 月至 2012 年 1 月在南极半岛北端周边海域获得的 5 条断面观测温盐剖面数据对温盐结构和水团组成进行了分析,取得以下认识。

南设得兰群岛以北海域呈现南大洋陆坡区的典型温盐结构,北部离岸海域的中层为以垂向温度极大值为特征的 CDW,核心温度超过 2°C ,为整个观测海域中最暖的水团;CDW 与南设得兰群岛近岸的冷水之间存在较强的次表层锋面—陆坡锋。在象岛的东北面观测到 1 500 db 的高盐核心,其上 550—1 000 db 之间存在温度基本不变,盐度随深度显著增大的较暖水体,表明 WDW 能够到达南设得兰群岛以北,但是可能经历了不同的路径和变性过程。

在观测区域的南部,即鲍威尔海盆和南奥克尼海台西南侧的深海区,可以观测到保持了较显著高温和高盐特征的 WDW,其高盐核心比高温核心深约 100 m;陆坡上的 WDW 则表现出高温高盐核心性质明显减弱且位置变深的特征,说明已经与周围水体发生了混合。在菲利普海岭、埃斯佩里兹海槽等复杂地形处,观测到的对应于 WDW 深度的混合与热盐入侵过程更为显著。

在鲍威尔海盆深水区能够观测到密度大于 $28.27\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 WSDW 以及温度低于 -0.7°C 的 WSBW。在周边的陆坡上,这两类水体都体现出有通风的迹象。

布兰斯菲尔德海峡中的底层水温度低至 -1.4°C ,是观测海域中最冷的底层水,海峡中没有 CDW 大规模侵入的迹象。乔治王岛周边陆架上的断面温盐分布图中存在一些中小尺度的结构,这里可能存在涡旋等过程,影响德雷克海峡与布兰斯菲尔德海峡之间的水交换。

观测海域的南部和北部都存在残留的冬季水,但是温度存在显著的南北差别,南部的冬季水更多地保留了冬季的特征,温度接近冰点,而最北部的冬季水已高于 0°C 。最南端的测站接近海冰边缘区,表层水明显受到融冰的影响,盐度低至 33.07。

致谢 现场考察得到中国第 28 次南极科学考察队和雪龙船的大力支持,CTD 数据处理得到美国海鸟公司技术人员和美国哥伦比亚大学袁小军教授的支持,海冰数据来自德国布莱梅大学,在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 Gordon A L. Structure of Antarctic Waters Between 20°W and 170°W [M]. New York: American Geographical Society, 1967: 6.
- 2 Gordon A L, Visbeck M, Huber B. Export of Weddell Sea deep and bottom water [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2001, 106(C5): 9005—9017.
- 3 von Gyldenfeldt A B, Fahrbach E, Garcia M A, et al. Flow variability at the tip of the Antarctic Peninsula [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2002, 49(21): 4743—4766.
- 4 Naveira Garabato A C, McDonagh E L, Stevens D P, et al. On the export of Antarctic Bottom Water from the Weddell Sea [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2002, 49(21): 4715—4742.
- 5 Naveira Garabato A C, Heywood K J, Stevens D P. Modification and pathways of Southern Ocean deep waters in the Scotia Sea [J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2002, 49(4): 681—705.
- 6 Gordon A L, Mensch M, Dong Z, et al. Deep and bottom water of the Bransfield Strait eastern and central basins [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(C5): 1337—1346.
- 7 董兆乾,阿诺尔德·戈顿,曼弗里德·门史. 南极布斯菲尔德海峡的海盆深层水和底层水 [C] // 陈立奇, 南极地区对全球变化的响应与

- 反馈作用研究,北京:海洋出版社,2004,26—35.
- 8 羊天柱,赵金三,许建平. 南设得兰群岛邻近海域夏季的水团与环流[C]//国家南极考察委员会,中国第一届南大洋考察学术研讨会论文集.上海:上海科学技术出版社,1989,1—13.
 - 9 Hofmann E E, Klinck J M. Thermohaline variability of the waters overlying the west Antarctic Peninsula continental shelf[M]//Jacobs S S, Weiss R F. Ocean, Ice, and Atmosphere: Interactions. Washington, DC: American Geophysical Union, 1998, 75: 67—81.
 - 10 Smith D, Hofmann E, Klinck J, et al. Hydrography and circulation of the west Antarctic Peninsula continental shelf[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1999, 46(6): 925—949.
 - 11 Capella J E, Ross R M, Quetin L B, et al. A note on the thermal structure of the upper ocean in the Bransfield Strait-South Shetlands Islands region [J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1992, 39(7-8): 1221—1229.
 - 12 Hofmann E E, Klinck J M, Lascara C M, et al. Water mass distribution and circulation west of the Antarctic Peninsula and including Bransfield Strait[M]. Foundations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula. Washington, DC: American Geophysical Union, 1996, 70: 61—80.
 - 13 Hernández-Molina F J, Larter R D, Rebesco M, et al. Miocene reversal of bottom water flow along the Pacific Margin of the Antarctic Peninsula: Stratigraphic evidence from a contourite sedimentary tail[J]. Marine Geology, 2006, 228(1-4): 93—116.
 - 14 Palmer M, Gomis D, del Mar Flexas M, et al. Water mass pathways and transports over the South Scotia Ridge west of 50°W[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2012, 59: 8—24.
 - 15 许建平,赵金三,羊天柱. 南设得兰群岛邻近海域物理海洋学特征和磷虾的关系[C]//国家南极考察委员会. 中国第一届南大洋考察学术研讨会论文集.上海:上海科学技术出版社,1989:14—25.
 - 16 Deacon G E R, Foster T D. The boundary region between the Weddell Sea and Drake Passage currents[J]. Deep Sea Research, 1977, 24(6): 505—510.

WATER MASSES AND EXCHANGES IN THE REGION AROUND THE NORTHERN TIP OF THE ANTARCTIC PENINSULA OBSERVED IN SUMMER 2011/2012

Shi Jiuxin, Sun Yongming, Jiao Yutian, Hao Guanghua, Wang Miao

(College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract

Water masses and exchanges in the region around the northern tip of the Antarctic Peninsula were analyzed based on temperature and salinity profile data observed along 5 sections during the 28th Chinese National Antarctic Research Expedition in December 2011 to January 2012. The Weddell Deep Water (WDW) with significant warm core, the Weddell Sea Deep Water (WSDW) and Weddell Sea Bottom Water (WSBW) with potential temperature less than -0.7°C with neutral density greater than $28.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ were found in the southern deep area of observing region, especially in Powell Basin. The WDW on the surrounding slope showed relative weaker core characteristics because of mixing with peripheral waters. In some locations with complex bottom topography, such as the Philip Ridge and Hesperides Trough, stronger mixing and thermohaline intrusion occurred at the WDW layer. WDW with a deeper saline core at 1 500 db, overlaid by warm water with vertically uniform temperature and salinity, was observed to the northeast of Elephant Island, indicating that the WDW might have come from different sources and undergone different modifications. No Circumpolar Deep Water was found in the Bransfield Strait; however, some mesoscale processes, such as eddies on the shelf near King George Island, could influence exchange between the Drake Passage and Bransfield Strait.

Key words water mass, circulation, Antarctic Peninsula, South Shetland Islands, South Orkney Plateau