

文章编号: 1674 - 5566(2013)02 - 0313 - 08

南极普里兹湾关键物理海洋学问题研究进展及未来趋势

高郭平¹, 董兆乾², 侍茂崇³, 刘洪生¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 中国极地研究中心, 上海 200136; 3. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 南极普里兹湾及其邻近海域关键物理海洋学问题包括水团特性、环流特征和冰架-海洋-海冰相互作用过程等。该海域水团可以分为南极表层水、绕极深层水、南极底层水、南极陆架水和南极冰架水等, 受外部条件影响, 这些水团时空变化显著。普里兹湾区域的环流以普里兹湾流涡, 西向的沿岸流和东向的绕极流, 以及两者之间的南极辐散带的环流为主要特征, 地形是环流特征的关键影响因素。埃默里冰架-海洋的相互作用过程显著影响普里兹湾海域的水团特性和环流状况。冰泵机制, 是埃默里冰架外海水进入冰穴, 并引起冰架底部消融和冻结的重要原因。冰架-海洋-海冰相互作用形成的低温高盐水, 是普里兹湾形成南极底层水的潜在因素之一。加强现场观测, 并建立高分辨率的冰架-海洋-海冰耦合模型系统是研究普里兹湾海域物理海洋学关键过程和变化机制的重要手段, 是南极研究的发展趋势。

研究亮点: 本文结合南极普里兹湾物理海洋学研究的特点和各个国家针对这一领域相关最新的科学计划, 系统分析了这一海域物理海洋学研究所取得的成果和研究中存在的不足, 提出未来研究的趋势和预期进展情况, 这为开展这一领域的研究工作提供了参考和前瞻性指导。

关键词: 普里兹湾; 水团; 环流; 冰架-海洋相互作用

中图分类号: S 931

文献标志码: A

南极普里兹湾(Prydz Bay)位于南大洋的印度洋扇区, 是嵌入南极大陆仅次于威德尔海和罗斯海的南极第三大海湾, 范围从66°E到79°E之间(图1)。普里兹湾的西南边是埃默里冰架(Amery Ice Shelf)——东南极最大的冰架, 湾的东南与英格丽-克里斯滕森海岸(Ingrid Christensen Coast)相接, 湾的西侧是麦克-罗宾逊地(Mac. Robertson Land)海岸和达恩利角(Cape Darnley)。湾的东部靠近陆架边缘是水深在200~300 m变化的四女士浅滩(Four Ladies Bank), 浅滩呈东北-西南走向, 该浅滩向西和向外陆架方向的坡度较小, 浅滩南部与陆地之间有深度可达500 m的水道, 这一水道与沿英格丽-克里斯滕森海岸外水深可以达到1 000 m的斯文纳深槽(Svenner Channel)相接, 有利于湾内外的水体交换。在埃默里冰架前缘, 是埃默里洼地(Amery Depression), 深度在600~700 m。在靠

近湾西部的区域还有几个封闭的深度可以达到1 400 m深槽, 分别是兰伯特深槽(Lambert Deep)和诺克深槽(Nanok Deep)。在湾的西侧是普里兹水道, 从埃默里洼地一直到陆架边缘600 m水深的地方, 湾西部的弗拉姆浅滩(Fram Bank), 位于达恩利角的东北侧, 将浅水区从岸边向陆架延伸。

1967年之前, 普里兹湾和南印度洋海洋学数据, 基本上是由Ob号船的三次考察取得的^[1], 以此数据, 利用等位势分析提出了南极绕极流(Antarctic circumpolar current, ACC)的纬向结构和西风驱动成因^[2]。其后, 利用“Discovery”数据发现了南印度洋南极绕极深层水(circumpolar deep water, CDW)的温盐最大值核心^[3]。对普里兹湾陆架区的考察发现表层分布着不规则的暖水, 垂向分布着不规则的冷水, 但动力学机制尚不清楚^[4-7], 同时还发现在湾内存在一个封闭型

收稿日期: 2012-10-30 修回日期: 2012-11-16

基金项目: 南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2012-01-01)

作者简介: 高郭平(1972—), 男, 教授, 研究方向为近海和极地海洋环流和动力过程。E-mail: gpgao@shou.edu.cn

环流^[8-9]。

随后较大规模的考察活动,是国际南大洋生物系统和资源考察(BIOMASS,1977-1986),各国在南大洋开展了大规模的海洋生物学、物理海洋学、海洋化学等多学科的调查和研究,这促进了对普里兹湾的海洋水团和基本环流特征的了解,以及动力学成因的深入分析^[10]。这期间,在普里兹湾及其邻近海域开展调查和研究工作的主要有澳大利亚、日本、法国等。近年来,开展的国际性大型考察计划,如 CLIVAR-Southern Ocean 和第四次国际极地年计划,也包括了普里兹湾海域的科学考察和研究行动。

中国南极科学考察始于 20 世纪的 80 年代,在 1985 年和 1989 年建成两个常年科学考察站,分别是南极半岛的长城站和东南极普里兹湾的中山站,到今年已经进行了 28 次的南极科学考察。而对南极普里兹湾海域的研究可以追溯到 1981 年中国派科学家参加 BIOMASS 等国际考察和合作研究活动。在建立南极中山科学考察站

后,利用极地科学考察船对考察站进行补给的航路和一些空隙时间,考察队也开展了普里兹湾及其邻近海域的科学考察活动。过去的 30 多年中,在非常有限的调查基础上,我国的南极物理海洋学研究,主要是对南极普里兹湾及其邻近海域的物理海洋环境,如温、盐度和水团分布及环流特性的研究,探讨了普里兹湾及其邻近海域的海洋特性的变化情况,取得一批研究成果。近年来,针对埃默里冰架-海洋相互作用过程及其影响,通过对冰架前缘进行的观测及相关研究,增加了对冰架水的形成和输运的认识,为进一步探讨冰架-海洋相互作用过程及其影响建立了基础。

对于普里兹湾及其邻近海域的物理海洋学研究成果,尤其是中国科学家在以往不同阶段的研究情况,都得到了-定的总结和评述^[11-13],本文结合近年来国内外的最新研究成果,分别从水团、环流、冰架-海洋-海冰相互作用等方面,系统阐述普里兹湾海域物理海洋学的研究进展,并对未来发展趋势做出分析和展望。

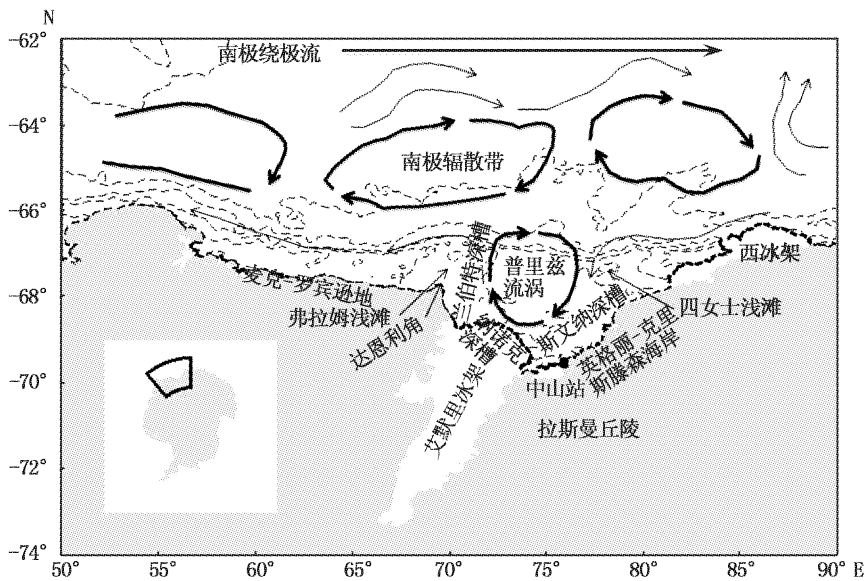


图 1 普里兹湾及其邻近海域地形和环流分布示意图

Fig.1 Bathymetry and schematic circulation of Prydz Bay and adjacent region

等深线为 100,500,1 000,2 000 m。

1 普里兹湾与邻近海域的水团和南极底层水形成

根据现场观测资料,普里兹湾及其邻近海域的水团可以划分为南极表层水(Antarctic Surface

Water, AASW), 南极陆架水(Shelf Water, SW), 南极绕极深层水(CDW) 和南极底层水(Antarctic Bottom Water, AABW)等 4 个主要类型(图 2),各个水团的空间上经向的分布示意如图 3,各个水团的具体特征指标见表 1,这在历次的现场观测

资料中都有体现^[10-15],不同水团的特点及变异情况也有讨论^[16-19]。

表 1 普里兹海域主要水团特征指标
Tab.1 Characteristic indexes of the Prydz Bay main water masses

水团名称		温度	盐度
南极表层水 (AASW)	夏季表层水 (AASSW)	-0.5 ~ 2°C	32.5 ~ 34.5
	冬季水 (WW)	< -1.5°C	34.2 ~ 34.5
绕极深层水 (CDW)		0.5 ~ 2.0°C	34.5 ~ 34.75
南极底层水 (AABW)	普里兹湾底层水 (PBBW)	< 0.0°C	> 34.62
	南极底层水 (AABW)	< 0.0°C	34.6 ~ 34.72
陆架水 (SW)	低盐陆架水 (LSW)	< -1.5 °C	< 34.25
	高盐陆架水 (HSW)	< -1.5 °C	> 34.5
冰架水 (ISW) < -1.9 °C		34.3 ~ 34.5	

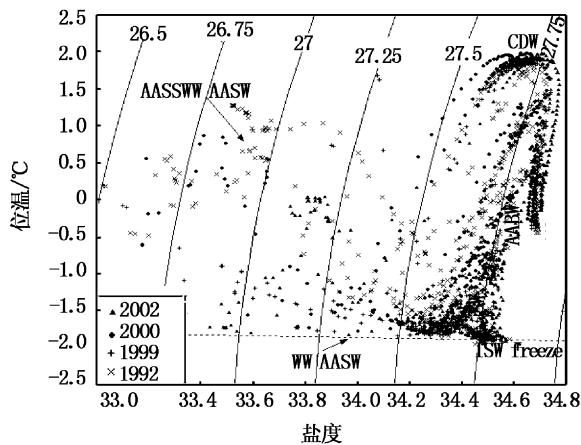


图 2 普里兹湾及其邻近海域 T-S 分布图

Fig. 2 T-S diagram of the Prydz Bay and adjacent regions

观测资料来自中国南极科学考察和澳大利亚南极科学考察。

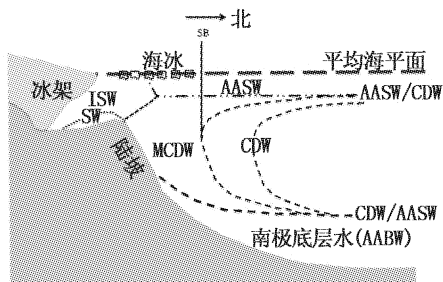


图 3 普里兹湾及其邻近海域水团经向分布图

Fig. 3 Meridional Schematic of the Prydz Bay and adjacent regions water masses

普里兹湾及其邻近海域的南极表层水 (AASW) 位于从表层到南极温跃层的深度, 南极表层水的北界是南极辐合带或南极锋 (polar

front, PF) 的位置, 南界是南极辐散带, 在南极锋附近, 南极表层水辐合下沉, 离开表层, 形成南极中层水, 而在南极辐散带附近, 南极表层水厚度最小。

在南极的冬季由于表面降温、冷却和海水结冰的共同作用, 以及风引起的强垂直混合, 在表层到 100 ~ 200 m 左右的深度上形成低温、高盐, 垂直方向上均一的水体, 称之为南极冬季水 (Antarctic winter water, WW)。在夏季, 由于太阳辐射的增强, 表层海水变暖, 温度升高; 同时海冰融化, 表层盐度降低, 表层水表现为相对高温、低盐的特性, 谓之南极夏季表层水 (Antarctic summer surface water, AASSW), 占据的深度一般在 50 m 以浅。南极夏季风力作用较弱, 海水垂直混合减弱, 在夏季表层水之下, 水团仍维持着南极冬季水的性质。在南极辐散带的位置, 对应的是南极冬季残留水深度最浅的、或南极绕极深层水涌升最大的纬度。

南极表层水空间分布有明显的区域化特征, 受到地形如弗拉姆浅滩和四女士浅滩等以及西冰架和埃默里冰架等影响, 从普里兹湾东部到湾西部的水平分布, 差异明显。由于岸线变化和沿岸地形的影响, 从南极大陆来的下降风, 引起的南极表层水和海冰的向北扩展差异较大, 局地的北向运动和南向运动相交错的现象, 形成不同的水体的上升和下降运动^[20]。从北向南由外海向南极大陆, 在纬度较低的陆坡区, 南极表层水占据的深度较浅, 不到 100 m, 而在纬度较高的陆架区, 南极表层水的深度可超过 200 m^[17]。

南极表层水年际变化显著, 不同年份, 南极表层水所占据的深度随纬度有比较明显的变化^[19-21]。在 73°E 断面上多年的观测结果表明, 不同年份南极冬季水的北向扩展可以相差 2 个纬距以上^[17]。

南极夏季表层水的特性与海冰的分布密切相关, 在海冰密集度高的地方, 温度明显偏低, 而盐度偏高, 在海冰较少的区域, 表层水温度偏高, 而盐度偏低, 南极表层水的特征, 也被用来反映南极海气热量交换情况^[22-25]。

此外, 南极表层水的分布与南极磷虾的丰度有密切的关系, 在南极冬季水向北扩展的冷舌与周围水体的强锋面处, 常常是南极磷虾密集的区域^[23, 26]。

在普里兹湾陆坡以外,南极表层水以下是南极绕极深层水(CDW),它是南大洋所占体积最大的一个水团,其温度的特征指标为 $0.5 \sim 2.0^{\circ}\text{C}$,盐度为 $34.50 \sim 34.75$ 。根据绕极深层水的温度极大值和盐度极大值不同特性,又可分为两个次级水团,分别是上层 CDW(UCDW),以低溶解氧和高营养盐为特征,和下层 CDW(LCDW),以高盐度为特征^[27],UCDW 的最高位温度可以大于 1.8°C ,而 LCDW 的盐度极大值可以高于 34.7 。绕极深层水的分布与南极绕极流(ACC)的变动密切相关,CDW 中 1.5°C 等值线的位置也被定义为 ACC 的南界(Southern Boundary, SB)^[27]。CDW 与 AASW 的水平分界的锋面定义为南极陆坡锋(Antarctic Slope Front, ASF),以次表层 0°C 等温线为分界线,对应水平方向温度梯度最大的位置。在 SB 和 ASF 之间的 CDW 为变性南极绕极深层水(Modified Circumpolar Deep Water, MCDW),它是向陆架/陆坡入侵的 LCDW^[23,27]。

CDW 在空间的分布并不均匀,在不同的经向断面,SB 的位置存在显著的变化^[23]。在同一经向断面上,不同的年份,CDW 的分布也存在显著的差异^[17],其南部边界 ASF 存在显著的年变化^[17,28],这种变化与 ACC 的变动密切相关,也与风场的变化有关系^[21,29],其影响机制仍有待进一步研究。

在普里兹湾的陆架上分布的低温、高盐度的陆架水(SW-Shelf Water),是由于冬季的结冰和强对流混合而形成,温度在 -1.5°C 以下,盐度在 34.5 以上。在普里兹湾陆架的上层及靠近南极大陆边缘盐度在 34.6 以下的部分称为低盐陆架水(LSSW);在陆架近底部盐度高于 34.6 的水体被称为高盐陆架水(HSSW)^[10,14,17]。埃默里冰架下海洋冰的再冻结和沿岸冰间湖引起的析盐,可以促进高盐陆架水的形成。

在普里兹湾海域埃默里冰架前缘的区域,有一种特别的水体,温度低于同盐度海水在海面的冰点,称为冰架水(Ice Shelf Water, ISW)。在埃默里冰架底部的压力大,海水的冰点降低,相对高温的陆架水进入冰架下的空穴,在冰架接地线附近与冰架底部接触,融化冰架而形成低温的冰架水^[10]。冰架水的形成和向北的输送,对于普里兹湾海域的其他水团特性有一定的影响^[10,30-33],冰架水在空间的分布和北向扩展存

在显著的年际变化^[30-33]。上世纪九十年代,利用冰架以外站位观测数据,发现经冰架冷却后于冰架前沿输出的冰架水为过冷却水(supercooled water),估计每年从冰架前沿向北输送的冰架融化淡水达 $10.7 \sim 21.9 \text{ Gt}$ ^[34]。普里兹湾的过冷却水出现在埃默里冰架外缘 $63 \sim 271 \text{ m}$ 的水层中,其温度和盐度范围分别是 $-2.14 \sim -1.96^{\circ}\text{C}$ 和 $34.39 \sim 34.46$,低于现场冰点 0.16°C ,比其周边的陆架水盐度稍低^[35]。

南极底层水是普里兹湾海域密度最大的水体。从现场温、盐观测资料分析和探讨普里兹湾形成南极底层水的可能性一直在进行^[16-17,25,36-41]。普里兹湾具备与其他几个南极底层水形成源地类似的条件,纬度高,冬季结冰,低温等。但是在普里兹湾海域一直未能直接观测到类似威德尔海等其他南极底层水形成区域的低温、高盐高密度的南极底层水羽,因此对于普里兹湾是否能够形成南极底层水,一直存在很多的疑问。在普里兹湾陆架边缘,涌升的变性南极绕极深层水(MCDW),在周期性潮汐的作用和其他因素作用下,可以入侵到陆架边缘的底部,与那里的高盐陆架水(HSSW)混合,形成低温、高盐、高密度的普里兹湾底层水(PBBW)^[15]。在很多观测中,比如在 73°E 多年的观测发现温度在 -1.8 以下,盐度在 34.6 以上的低温高盐高密度陆架水,厚度甚至超过 100 m ^[17],与 MCDW 混合的高密度底层水甚至高于相邻水体,从而有可能越过陆架边缘的海坎,沿陆坡向深层运动,但是其密度仍然低于 AABW。在普里兹湾陆架以外存在两种类型的南极底层水,由 θ -S 曲线形状比较,其中低盐型者是从南印度洋海盆通过伊丽莎白海槽向西平流到湾外的,而高盐型南极底层水,既非来自于威德尔-恩德比地海盆,也非来自于南印度洋海盆^[34]。在达恩角外海域观测到高溶解氧的底层水^[25],证实了这类底层水在局地形成,而非从其他海域形成输送到那里。因此,在普里兹湾西部海域,特定的条件下还是有可能生成南极底层水^[41]。

2 环流

普里兹湾海区环流的典型特征是存在一个顺时针的流涡(图 1),这在现场温度、盐度观测计算的动力高度分布和地转流计算^[1,6,12,31],以及数

值模型结果都得到验证^[43-45]。

在普里兹湾海域的近岸区域存在西向的沿岸流,从湾的东部一直延伸到湾的西部,这与沿岸的东风相一致。在湾的北部海区为向东的南极绕极流(ACC),其南界是绕极深层水的 1.5 °C 等温线,在普里兹流涡和 ACC 之间是南极辐散带,位置在 63° 30' ~ 66°S 附近。普里兹湾海域的经向环流的主要特征是上层海水的北向运动^[26,30,39],南极绕极深层水的南向运动,以及底层水的北向运动等^[37]。南极辐散带的位置,对应于南极陆坡锋的位置,也是北向运动的上层海水和南向运动的绕极深层水的分界,受外部条件的影响,其时空变化显著^[17,28,37]。

采用诊断模型和冰-海耦合模型都模拟出与观测结果类似的流场特征^[43,45],数值试验验证了地形的作用是普里兹湾海域流场特征的重要原因,湾内的气旋式环流特征在各个层次上都存在,而且存在季节变化,在沿岸区域的西向流,与陆坡平行,另外,外陆架外的流场受到克尔盖朗海台对南极绕极流的影响。对埃默里冰架下环流特性的模拟,显示冰架下存在顺时针的环流,入流在冰架边缘的东部,出流在冰架边缘的西部,与冰架外的流场吻合^[45-46]。

3 埃默里冰架-海洋相互作用

普里兹湾的西南部是埃默里冰架,其下的空穴由海水填充,向南直达 73.20°S,着陆线到冰架前沿的距离超过 500 km。从埃默里冰架底部到冰架边缘,冰架-海洋发生复杂的相互作用过程,引起冰架底部的融化和海水的冻结。在南极水循环中,大量积雪以冰川的形式,流入南大洋。在东南极,有 16% 的冰川通过兰伯特冰川输入到埃默里冰架,并最终注入海洋。从卫星遥感资料和现场观测资料,最新估计的年平均冰架融化为 $(62.5 \pm 9.3) \text{ Gt} (10^9 \text{ t})$,而冰架底部每年由于冰架-海洋相互作用冻结形成的海洋冰为 $(16.2 \pm 2.4) \text{ Gt}$,冰架净消融每年约 $(46.4 \pm 6.9) \text{ Gt}$ ^[47]。冰架-海洋相互作用显著影响普里兹湾的水团特性和环流状况。冰架-海洋相互作用的一个重要动力学特征是冰泵机制(图 4)。

冰架外温度相对较高的高盐陆架水,沿陆架底层进入到冰架下洞穴,高盐陆架暖水到达冰架着陆处,与冰架相接触,开始融化冰架,冰架融化

产生的淡水与高盐陆架水相混合形成的新的低密度水,这种低密度水在浮力作用下开始沿冰架底部倾斜上升,从而抽吸更多的陆架水进入洞穴,延续冰架底部的融化,而混合低密度水上升的同时,由于压力减小,冰架底部的融点也升高,融化速率也逐渐变慢,在上升到一定深度,混合水的温度可以低于该深度的冰点,就会重新凝结,形成冰晶,这种冰晶会浮于海水中,或附着到冰架的底部,成为有别于冰架冰的海洋冰,这一系列的冰架海洋的相互作用的驱动机制又称为冰泵机制。在 2009 年进行的我国第 25 次南极科学考察的埃默里冰架钻探中,就获得超过 20 m 厚的海洋冰。冰泵抽吸的高盐陆架水与冰晶形成析出盐份而形成的低温甚至过冷却水会沿等密度面流动,在一定深度以冰架水的形式流出冰架下的空穴前沿,进入普里兹湾中。

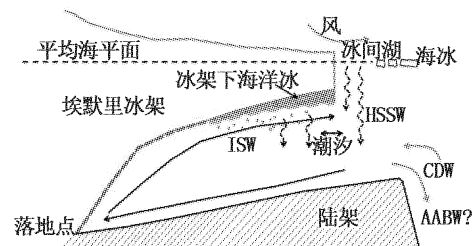


图 4 埃默里冰架-海洋相互作用及水泵示意图
Fig. 4 Schematic of the ice-shelf and ice-pump mechanism

南极普里兹湾海域,潮汐作用非常显著,最大潮差可以超过 2 m,周期的潮汐作用可以将冰架外相对温暖的表层水带到冰架下,促进冰架外缘区的融化。埃默里冰架下的空穴向陆延伸 500 km 以上,冰穴的深度在数百米以上,尽管这一距离超过潮程和潮汐影响的深度,潮汐的直接运输作用并不能影响到冰架下的冰穴内部^[48]。但是,潮汐作用增强冰架下海洋的混合,从而从另一个方面促进冰架-海洋相互作用^[48]。

从埃默里冰架-海洋耦合模型的模拟显示,冰架水流出冰架的出口是在靠近冰架的西侧^[49]。冰架的冷却作用,使过冷海水上移,而再冻结形成海洋冰并析出盐分,促进海水增密。而在普里兹湾冬季冰间湖发生区域,增加海冰的形成和析盐,也促进海水盐度升高,密度增加,这些高盐水从湾内流出,与南极绕极深层水混合,有利于形成南极底层水。在综合考虑冰架下冰晶形成和

海洋冰的情况下,估算的南极普里兹湾-埃默里冰架区域产生的南极底层水为 $1.5 \text{ Sv}^{[49]}$ 。在耦合模型中,通过冰架-海洋的相互作用过程,可以得到南极底层水,这间接证明了普里兹湾生成南极底层水的可能性。埃默里冰架融化和向海洋输送淡水,会显著地抑制普里兹湾高盐水的形成,同时也减少南极底层水的形成,在数值试验中,如果不考虑埃默里冰架-海洋的相互作用,仅仅考虑冰架的冷却作用而造成的海洋冰的形成,会过高地估计南极底层水的形成^[49]。

4 未来研究展望

普里兹湾及其邻近海域相对于南极周边的其他海域,已经开展的观测工作还比较有限,研究也不够深入,还存在是否能够形成南极底层水等未解决的问题。在过去的研究中,对于普里兹湾基本的水团、环流等状况有了比较多的了解。在最近的一些国际联合研究计划和国家研究计划中,这一海域的调查和观测将进一步增加,这将有助于促进研究工作的开展。

在澳大利亚的南极计划中,从1999年开始开展为期10年的埃默里冰架海洋研究(the Amery Ice Shelf Ocean Research, AMISOR)项目,在埃默里冰架逐年钻取了6个热水孔和一些冰芯孔,进行冰架-海洋过程的观测和长期监测,同时在冰架边缘进行高分辨率的观测,辅以其他观测,对埃默里冰架的变化及冰架-海洋相互作用过程进行观测和研究^[50-51],同时开展冰架-海洋相互作用的数值模型研究^[49]。澳大利亚在2006年开展了西南印度洋大范围的海洋、磷虾和环境基准调查(Baseline Research on Oceanography, Krill and the Environment, BROKE-West),以更新磷虾生物量的估计,为提供南极海洋生物资源保护委员会(the Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR)制定磷虾限捕政策提供科学依据^[23-25]。日本的南极鲸研究计划(Japanese Whale Research Program in the Antarctic, JARPA),在普里兹湾海域进行了大范围的海洋环境和资源调查。在这些研究中,澳大利亚、日本、法国和美国等国家的科学家,开展了联合研究^[41]。

中国对南极普里兹湾开展的海洋科学研究,从2000年以来也聚焦到关注埃默里冰架-海洋的

相互作用的问题,开展了冰架前缘的观测和冰架的冰芯钻取等工作,但是受限于船时等因素,开展的调查区域和调查内容都比较局限。随着新的极地环境调查专项的启动和新一代破冰船的建设,中国在这一海域开展调查和研究将进一步深入。另外,在冰架下开展现场考察,一直受到很多的限制,一种方案是通过热水钻,钻透冰架,进行观测;也可以进行冰下的水下机器人考察,这也是未来埃默里冰架开展现场考察的必要手段,这也已列入我国的考察计划和科学研究计划。

南极恶劣的环境条件,进行现场观测的空间覆盖率和时间上的持续性受到很大的限制,已有的观测资料可以反映出普里兹湾的基本状况,但是要进一步了解南极普里兹湾海域的海洋状况的变化特征和影响因素还存在很多困难。利用遥感观测资料,可以对埃默里冰架质量平衡进行估计^[47],分析冰架的演变,为进一步评估冰架的变化,对海洋和气候的影响提供了基础。遥感资料,可以反映出普里兹湾海域海冰的变化情况,从海洋-海冰耦合模型也反映出这一海域海冰的变化情况,对于冰架-海洋-海冰的相互作用的耦合模型,还有待进一步的研究和开发。

对于普里兹湾及其邻近海域的研究,在加强现场观测的基础上,借助于遥感手段,同时建立高分辨率的冰架-海洋-海冰数值模型,是研究这一海域冰架-海洋-海冰变化的必要手段。

参考文献:

- [1] WYRTIKI K. Oceanographic atlas of the International Indian Ocean Expedition [M]. Published by National Science Foundation, Washington, D C, 1971:531.
- [2] CALLAHAN E. The structure and circulation of Deep Water in the Antarctica[J]. Deep-Sea Research, 1972, 19:563 - 575.
- [3] JACOBS S, GEORGI D T. Observations on the southwest Indian Antarctic Ocean [M]//ANGEL M V. Voyage of Discovery, Deep-Sea Research supplement, 1977, 24: 43 - 84.
- [4] ZVERREV A A. Anomalous sea water temperatures in the Prydz Bay[M]. Soviet Antarctic Expedition I, 1959: 269 - 271.
- [5] ZVERREV A A. Currents in the Indian Sector of the Antarctica [J]. Trudy Sovetskoi Antarkticheskoi Ekspeditsii, 1963, 17:144 - 155.
- [6] IZVEKOV M V. Results of observations on currents in the

- region of the West ice Shelf [M]. Soviet Antarctic Expedition, 1959, 2:91-93.
- [7] GRIGOR'YEV Y A. Hydrological investigations in the Prydz Bay [J]. Trudy Sovetskoi Antarkticheskoi Ekspeditsii, 1970, 54: 180-199.
- [8] KORNILOV N A. The fourteenth Soviet Antarctic Expedition. General description [J]. Trudy Sovetskoi Antarkticheskoi Ekspeditsii, 1971, 57:8-98.
- [9] SAVATIUGIN L M, V V. Hydrological features of the Prydz Bay in February, 1969 [J]. Trudy Sovetskoi Antarkticheskoi Ekspeditsii, 1971, 57:99-104.
- [10] SMITH N R, DONG Z, KERRY K R, et al. Water masses and circulation in the region of Prydz Bay, Antarctica [J]. Deep-Sea Research I, 1984, 31:1121-1147.
- [11] 乐肯堂. 普里兹湾及邻近海区水团和环流研究述评 [J]. 海洋科学, 1995(2):26-30.
- [12] 蒲书箴, 董兆乾. 普里兹湾附近物理海洋学研究进展 [J]. 极地研究, 2003, 15(1):53-64.
- [13] 史久新, 赵进平. 中国南大洋水团、环流和海冰研究进展 (1995-2002) [J]. 海洋科学进展, 2002, 20(4):116-126.
- [14] NUNES V R A, LENNON G W. Physical oceanography of the Prydz Bay region of Antarctic waters [J]. Deep-Sea Research I, 1996, 43: 603-641.
- [15] MIDDLETON J H, HUMPHRIES S E. Thermohaline structure and mixing in the region of Prydz Bay, Antarctica [J]. Deep-Sea Research, 1989, 36:1255-1266.
- [16] 董兆乾, 梁湘三. 南极海冰、冰穴和冰川冰及其对水团形成和变性的作用 [J]. 极地研究, 1993, 5(3):1-16.
- [17] 高郭平, 董兆乾, 侍茂崇. 南极普里兹湾附近 73°E 断面水文结构及多年变化 [J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2003, 33(4):493-502.
- [18] 乐肯堂, 史久新, 于康玲. 普里兹湾水团和热盐结构的分析 [J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(3):229-236.
- [19] 乐肯堂, 史久新, 于康玲, 等. 普里兹湾水团和环流时空变化的若干问题 [J]. 海洋科学集刊, 1998(40):43-54.
- [20] 侍茂崇, 宁修仁. 普里兹湾西部海域水文特征 [J]. 青岛海洋大学学报, 1995, 25(s):277-292.
- [21] 蒲书箴, 董兆乾, 胡筱敏, 等. 普里兹湾海域的夏季上层水及其北向运动 [J]. 极地研究, 2000, 12(3):157-168.
- [22] 孙日彦. 南极普里兹湾海域夏季异常表层水温及其成因 [J]. 青岛海洋大学学报, 1994, 24(4):593-598.
- [23] WILLIAMS G D, NICOL S, AOKI S, et al. Surface oceanography of BROKE-West, along the Antarctic margin of the south-west Indian Ocean (30-80°E) [J]. Deep-Sea Research II, 2010, 57:738-757.
- [24] WILLIAMS G D, NICOL S, RAYMOND B, et al. Summertime mixed layer development in the marginal sea ice zone off the Mawson coast, East Antarctica [J]. Deep-Sea Research II, 2008, 55:365-576.
- [25] MEIJERS A J S, A. KLOCKER N L, BINDOFF, et al. The circulation and water masses of the Antarctic shelf and continental slope between 30 and 80° E [J]. Deep-sea Research II, 2010, 57:723-737.
- [26] 侍茂崇, 董兆乾, 高郭平. 普里兹湾附近海域磷虾集群的物理海洋环境 [J]. 青岛海洋大学学报, 1995, 25(s):265-276.
- [27] ORSI A H, JOHNSON G C, BULLISTER J L. Circulation, mixing and production of Antarctic Bottom Water [J]. Progress in Oceanography, 1999, 43:55-109.
- [28] 蒲书箴, 董兆乾, 胡筱敏, 等. 普里兹湾陆缘水边界的变化 [J]. 海洋通报, 2000, 19(6):1-9.
- [29] 蒲书箴, 董兆乾, 于卫东, 等. 南印度洋绕极深层水的性质和空间分布以及南极绕极流的作用 [J]. 海洋科学进展, 2007, 25(1):1-8.
- [30] 陈红霞, 潘增弟, 矫玉田, 等. 埃默里冰架前缘水的特性和海流结构 [J]. 极地研究, 2005, 17(2):139-148.
- [31] 蒲书箴, 葛人峰, 董兆乾, 等. Emery 冰架北缘热盐结构的不均匀性及其成因 [J]. 海洋科学进展, 2007, 25(4):376-382.
- [32] ZHENG S, SHI J, JIAO Y, et al. Spatial distribution of Ice Shelf Water in front of the Amery Ice Shelf, Antarctica, in summer [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011, 29(6):1325-1338.
- [33] 蒲书箴, 葛人峰, 董兆乾, 等. 史久新. 埃默里冰架北缘海洋水文特征的变化 [J]. 极地研究, 2010, 22(3):244-253.
- [34] WONG A P S, BINDOFF N L, FORBES A. Ocean-ice shelf interaction and possible bottom water formation in Prydz Bay, Antarctica, Ocean, Ice and Atmosphere: Interactions at the Antarctic Continental Margin [M]. American Geophysical Union Antarctic Research Series 75, 1998:173-187.
- [35] SHI J, CHENG Y, JIAO Y, et al. Supercooled water in austral summer in Prydz Bay, Antarctica [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011, 29(2):427-437.
- [36] 梁湘三, 董兆乾, 苏纪兰. A condition for the formation of Antarctic Bottom Water in Prydz Bay, Antarctica [J]. Antarctic Research, 1994, 5(1):62-74.
- [37] 蒲书箴, 胡筱敏, 董兆乾, 等. 普里兹湾附近绕极深层水和底层水及其运动特征 [J]. 海洋学报, 2002, 24(3):1-8.
- [38] 苏玉芬. 南极普里兹湾及其沿岸夏季深层水的涌升 [J]. 海洋湖沼通报, 1987(2):17-24.
- [39] 于洪华, 苏纪兰, 苗育田. 南极普里兹湾及其邻近海域的水文结构特征和底层水的来源 [J]. 海洋学报, 1998, 20(1):11-20.
- [40] 周培强, 孙日彦. 南极普里兹湾海域水文特征研究-夏季温、盐分布特征及底层水形成的探讨 [J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 1995, (04):445-452.
- [41] YABUKI T, SUGA T, HANAWA, et al. Possible source of Antarctic Bottom Water in Prydz Bay region [J]. Journal of Oceanography, 2006, 62:649-655.
- [42] 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(s):359-365.
- [43] 侍小兵, 俞光耀, 董兆乾. 南极普里兹湾夏季流场诊断分析[J]. 青岛海洋大学学报, 1995, 25(s):293-311.
- [44] 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(s):312-325.
- [45] 史久新, 乐肯堂, 于康玲. 普里兹湾及其邻近海区冰—海相互作用的数值研究 II 环流[M]. 海洋科学集刊, 2000, 42:22-37.
- [46] WILLIAMS M J, GROSFELD M, WARNER K, et al. Ocean circulation and ice-ocean interaction beneath the Amery Ice Shelf, Antarctic [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (22):383-399.
- [47] WEN J, WANG Y, WANG W, et al. Basal melting and freezing under the Amery Ice Shelf, East Antarctica[J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(195):81-90.
- [48] MACAYEAL D R. Evolution of tidally triggered melt water plumes below ice shelves [M]. Antarctic Research Series, 1985, 43:133-143.
- [49] GALTON-FENZI B K. Modeling ice-shelf/ocean interaction [D]. University of Tasmania, Hobart, Australia, 2009.
- [50] ROSENBERG M, BINDOFF N, CURRAN C, et al. Amery Ice Shelf Experiment (AMISOR) - marine science cruises AU0106 and AU0207-oceanographic field measurements and analysis [R]. Antarctic Cooperative Research Center, Research Report No. 30, Hobart, Australia, 2002.
- [51] FRICKER H A, POPOV S, ALLISON I, et al. Distribution of marine ice beneath the Amery Ice Shelf[J]. Geophysical Research Letter, 2001, 28:2241-2244.

Advances of physical oceanographic study on Prydz Bay and adjacent region, Antarctica

GAO Guo-ping¹, DONG Zhao-qian², SHI Mao-chong³, LIU Hong-sheng¹

(1. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China; 3. College of Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: The key physical oceanographic issues of the Prydz Bay and adjacent region, Antarctica, include water masses, circulation and ice shelf-ocean-sea ice interactions. The water mass may be classified into Antarctic Surface Water (AASW), Circumpolar Deep Water (CDW), Antarctic Bottom Water (AABW), Shelf Water (SW) and Ice-shelf Water (ISW). Spatial distribution and temporal variation of the water masses are significantly affected by external forcing. Circulation in the Prydz Bay is characterized by the Prydz Gyre, westward coastal current, and Antarctic Circumpolar Current (ACC). The Antarctic Divergence (AD) is located in the shear zone between coastal current and ACC. The local topography plays an important role to the circulation in this region. Interaction between the Amery Ice Shelf and ocean impacts the water mass and circulation. Ice-pump is the major mechanism that drives the relative warmer shelf water entering the ice cavity and melting the ice shelf. The cold and saltier water formed by ice shelf-ocean-sea ice interaction is the potential source for the formation of AABW. In the future, observations and development of high-resolution ice shelf-ocean-sea ice model will be the major means for physical oceanographic study in the region.

Key words: Prydz Bay; water mass; circulation; ice shelf-ocean interaction