

陈红霞,林丽娜,史久新. 南极普里兹湾及其邻近海域水团研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(7): 1—8, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2014.07.001

Chen Hongxia, Lin Lina, Shi Jiuxin. Study on water masses in Prydz Bay and its adjacent sea area[J]. Acta Oceanologica Sinica(in Chinese), 2014, 36(7): 1—8, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2014.07.001

南极普里兹湾及其邻近海域水团研究

陈红霞^{1,2}, 林丽娜^{1,2}, 史久新³

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 3. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 普里兹湾及其邻近海域是中国南大洋调查研究的传统优势海域与重点区域。围绕夏季表层水、冬季水、陆架水、绕极深层水、南极底层水、普里兹湾底层水、冰架水等研究海区主要水团的特征和分布,总结了前人在南极普里兹湾及其邻近海域基于调查资料开展的水团研究中所取得的成果。研究表明,前人在对陆架水的示性指标界定上,将陆架水是否区分为高盐陆架水和低盐陆架水存在较大争议,在高盐陆架水和普里兹湾底层水的定义上存在重叠;目前尚没有证据表明绕极深层水向南可以伸展到普里兹湾的陆架区域,也没有发现在普里兹湾附近海域生成南极底层水的直接证据。

关键词: 普里兹湾; 南大洋; 示性指标; 南极底层水

中图分类号: PX4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2014)07-0001-08

1 引言

普里兹湾位于南大洋印度洋扇区,面积约为 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。海湾呈西南—东北走向,是南大洋中呈喇叭型深深嵌入东南极大陆的一片水域。南面是与兰姆伯特大冰川相连接的埃默里冰架,湾口的最东端位于($70^\circ\text{S}, 76^\circ\text{E}$)左右,靠近四女士浅滩;最西端位于($68^\circ\text{S}, 69^\circ\text{E}$)附近,靠近弗拉姆浅滩。在南极大陆的所有海湾中,除了威德尔海和罗斯海以外,普里兹湾是面积最大的。普里兹湾的水深较浅,约 $400 \sim 600 \text{ m}$ 。湾口以北陆架坡折处水深骤增,但随着向北距离的增加,水深变化再趋平缓,保持在 $3\,000 \text{ m}$ 左右。位于四女士浅滩和弗拉姆浅滩中间的一个凹槽,水深

在 500 m 左右,是湾内外物质和能量交换的主要通道。在冬季,整个海湾被冰厚可达 2 m 的海冰覆盖;夏季,海冰破裂,部分消融,但浮冰覆盖率仍高,且覆盖区多变^[1]。通常,湾内较早出现无冰水域,而湾口的两个浅滩处却存在尚未融化的冰舌^[2]。此外,由于普里兹湾所在的东南极的陆地比西南极向北更加突出,普里兹湾受到南极大陆、冰川、冰架、海冰和南大洋的综合影响较大。

中国南极科学考察开始于 1984 年,迄今已连续完成了 29 个航次,这些航次大多采取搭乘考察船并以 CTD 水文调查为主开展综合水体考察任务,分别以普里兹湾及其邻近海域、南极半岛附近海域为重点海区完成了 19 个、3 个航次的调查工作。自我国在

收稿日期: 2013-10-29; **修订日期:** 2014-04-11。

基金项目: 国家重点基础研究发展项目——南大洋—印度洋海气过程对东亚及全球气候变化的影响(2010CB950301); 国家高科技研究发展计划项目——冰架热水钻关键技术与系统研发(2011AA090401); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项——极地海洋环境监测网系统研发及应用示范(201305035); 极地专项南极海域物理海洋和海洋气象考察(CHINARE2012-01-01, CHINARE2013-01-01); 极地专项南极环境综合分析与评价(CHINARE2013-04-01)。

作者简介: 陈红霞(1975—), 男, 山东省聊城市人, 博士, 副研究员, 主要从事区域海洋学与极地海洋学研究。E-mail: chenhx@fio.org.cn

南极建立中山站以来,普里兹湾及其邻近海域成为中国南大洋研究的重点区域,在包括埃默里冰架前缘、从湾内到深水区的经向延伸、海湾两侧特别是西起 62.5°E 东至 108°E 的广阔海域内布设了较为固定的站位(图 1),特别在 $68^{\circ}\sim 78^{\circ}\text{E}$ 之间的数条经向断面上进行了多年的物理、化学和生物观测,积累了丰富的资料,我国成为在该海区从事科学研究的主要国家之一。

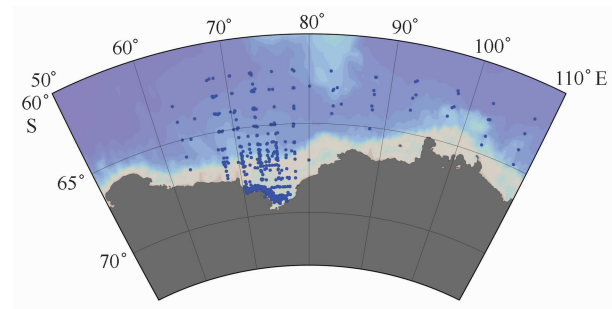


图 1 中国历次南极考察普里兹湾及邻近海域 CTD 站位分布

Fig. 1 Antarctic CTD stations map in Prydz Bay and adjacent sea of CHINA

普里兹湾及其邻近海域是国际上最为关注的热点研究海区之一,澳大利亚、美国、日本、俄罗斯等国家在普里兹湾及其邻近海域开展了多年的物理、化学和生物观测,在研究中取得了相当大的进展。本文将对中外学者在水团研究方面所取得的成果进行综述,重点阐述关于夏季表层水、冬季水、陆架水、绕极深层水、南极底层水、普里兹湾底层水和冰架水的研究进展,以便为将来的研究和其他相关领域的工作提供参考。

2 普里兹湾邻近海域主要水团分类

根据 Deacon^[3] 的分类标准,乐肯堂^[4] 把普里兹湾及其邻近海域的水团分为 5 类,即南极表层水(ASW)、绕极深层水(CDW)、南极底层水(AABW)、陆架水(CSW)和冰架水(ISW),其中前 3 类位于大洋海域,后 2 类位于陆架海区。

蒲书箴和董兆乾^[5] 则认为普里兹湾至 60°S 极锋以南的南大洋海域内的水团主要包括:南极表层水、普里兹湾陆架水、绕极深层水和南极底层水 4 种类型,并依照 Mosby^[6] 的划分标准,将南半球夏季的南极表层水再分为夏季表层水(SSW)和冬季水(WW)。

Smith 等^[7] 按照 Carmack^[8] 的分析把陆架水再分

为高盐陆架水和低盐陆架水两类,它们具有共同的温度指标,其差异主要是在盐度的范围上。

Middleton 和 Humphries^[9] 将 1982 年夏季在普里兹湾陆架外缘观测到一种高密度混合水定义为普里兹湾底层水(PBBW)。PBBW 介于陆架水和暖深层水之间,是陆架水和暖深层水的混合水。一般位于普里兹湾及其陆架外缘的底层,水深介于 $500\sim 1\,000\text{ m}$ 之间^[10]。

以上水团构成了普里兹湾及其邻近海域相对完整的水团分类,即:夏季表层水、冬季水、陆架水、绕极深层水、南极底层水、普里兹湾底层水、冰架水。其中冰架水主要位于冰架前缘及其附近海域,夏季表层水、陆架水和普里兹湾底层水主要位于陆架和陆坡海域,夏季表层水、冬季水、绕极深层水、南极底层水主要位于大洋深水区。

3 各类水团研究概况

3.1 南极表层水

南极表层水广泛地分布在南极大陆向北到南极辐散带之间,位于温度最小值层之上,是由寒冷的极地大气、海冰融化和冻结共同作用的产物。在南半球的夏季,南极表层水又可分为夏季表层水和南极冬季水^[5]。

夏季表层水位于季节跃层之上,其示性特征是水温较高($-0.5^{\circ}\text{C}\leq T<1.2^{\circ}\text{C}$)、盐度相对低而变动范围大($32.50<S<34.56$)、物理性质空间变化较大的一个水团,不像研究海区其他水团那样有一个稳定少变的核心温度和盐度,在 T-S 点聚图上没有明确的核心区^[4-5]。

贺志刚等^[11] 利用第 19 次南极考察 XBT 和 XCTD 数据,对南大洋断面上层的水团分析表明,夏季表层水广泛分布在 62°S 以南的 $30\sim 50\text{ m}$ 以浅海域。

蒲书箴和董兆乾^[5] 利用近 30 a 的文献资料对夏季表层水的概述为:SSW 是夏季海洋上层受季节性加热和融冰的作用而形成的,位于季节跃层之上。由于夏季的风速较弱,上混合层的厚度较小,其垂直范围在 $30\sim 50\text{ m}$ 以浅。

史久新和赵进平^[12] 在总结 1995—2002 年中国在南大洋物理海洋学研究成果时指出,南极夏季表层水在历次考察资料中都可以识别;南极夏季表层水在普里兹湾及其北侧海域厚度约为 20 m ,最大厚度出现在普里兹湾的湾顶,大约 30 m ;普里兹湾以东海域

0~30 m 为夏季表层水。

冬季水的特征指标是 $T < -1.5^{\circ}\text{C}$, $34.20 \leq S \leq 34.56^{[7]}$ 。冬季水的成因是:在冬季的南极长夜里,随着阳光的减少、气温的下降、寒风的加强,海水的垂直对流导致整个上层海洋的大幅降温;在海面冰封以后,海冰的盐析作用加强了冰下海水的强对流,从而形成了其低温高盐特性^[13]。

乐肯堂^[4]研究指出,南极冬季整个表层水温都低于 -1.5°C ,表层均可能为冬季水占据,其核心部分的平均深度为 100 m;在陆架,冬季对流可以到达深得多的深度,而且温度最小值位于深的近底水中。

当夏季来临时,SSW 的稳定层结使得季节的增温作用难以影响到其下的 WW,因此夏季观测到的 WW 是冬季寒冷事件的残存记忆^[5]。夏季 WW 位于夏季表层水与绕极深层水之间,其垂直范围在 30~70 m^[12],在一些航次也曾观测到 WW 的核心部分位于 40~120 m 的水层中^[14]。鉴于 64.3°S 附近是南极辐散带所在地,CDW 涌升剧烈,WW 在此处最浅仅为 60 m,由此向南 WW 所处深度有所增加,并在 66.0°S 附近达到最大值 130 m 左右^[11]。

3.2 陆架水

陆架水的成因与 WW 相同,两者最大区别在于:前者是残留在陆架海域对寒冬的记忆,其下为陆架区域;而后者是残留在开阔洋区对寒冬的记忆,在其之下是较暖的绕极深层水;两者在物理性质和成因方面并无太大差别,而且均分布在夏季表层水之下^[13]。

关于陆架水的示性指标和划分类型上,目前观点尚不统一。

Smith 等^[7]、Carmack^[8]均把陆架水分为高盐陆架水和低盐陆架水两类,并给出它们共同的温度指标是 $T \approx -1.8^{\circ}\text{C}$,而盐度的差异在于前者 $S > 34.5$ 、后者 $S < 34.25$ 。但 Middleton 和 Humphries^[9]对 1982—1985 年的普里兹湾资料分析后指出,陆架水的特征指标是 $T < -1.5^{\circ}\text{C}$, $S > 34.56$ 。乐肯堂等^[14]结合中国第六、第七次南极考察数据认为陆架水的温度示性指标是 $T < -1.5^{\circ}\text{C}$,高盐陆架水的盐度示性指标是 $S > 34.5$ 。Nunes 和 Lennon^[15]则认为高盐陆架水和低盐陆架水的盐度分界线是 $S = 34.6$ 。

Whitworth 等^[16]则认为高盐陆架水和低盐陆架水的划分标准是模棱两可的,并提出普里兹湾所有的陆架水均是低盐陆架水。而 Pu 等^[17]根据中国第 15 次南极考察的结果,指出普里兹湾陆架水的示性特征是 $T < -1.8^{\circ}\text{C}$, $34.4 < S < 34.5$ 。Shi 等^[18]最新的研

究成果与 Middleton 和 Humphries^[9]、Pu 等^[17]一致,也没有对陆架水进行进一步的划分。

基于不同的判别标准,前人对普里兹湾陆架水在高盐陆架水还是低盐陆架占优上也存在认识上的差异。Carmack^[8]、Carmack 和 Foster^[19]的研究表明印度洋扇区内大部分的陆架水是低盐陆架水,与高盐陆架水占主导地位的罗斯海和威德尔海相比,在普里兹湾附近低盐陆架水占主要地位。而 Middleton 和 Humphries^[9]给出的陆架水指标($S > 34.56$)则直接排除了低盐陆架水的存在,乐肯堂等^[14]的研究结果也表明除了在靠近中山站附近极小区域内存在低盐陆架水($S < 34.25$)外,普里兹湾内及其以北到 66°S 的范围内陆架水主要是高盐陆架水($S > 34.50$)。

对陆架水的一般认识是高盐陆架水主要分布在宽阔的陆架上,而低盐陆架水则主要分布在狭长的陆架上。Fahrbach 等^[20]认为正是由于普里兹湾具有宽阔的陆架,才使得陆架水的盐度足够高,从而有可能在当地形成南极底层水。但乐肯堂^[4]认为与威德尔海和罗斯海相比较,普里兹湾面积小且陆架窄反而是湾内高盐陆架水的重要原因。蒲书箴和董兆乾^[5]则认为普里兹湾附近的地形和陆架宽度与低盐陆架水的存在有着密切关系。

乐肯堂等^[14]提出的高盐陆架水示性指标与 Middleton 和 Humphries^[9]提出的陆架水特征指标最为接近。如果以此标准为判据,则高盐水的范围比以 Smith 等^[7]的特征指标为判据的高盐水范围略宽。

由此可见,前人不仅对陆架水示性指标的界定上存在较大差异,在陆架水是否再划分为高盐陆架水和低盐陆架水的观点也截然不同,即便是主张将陆架水分为高盐陆架水和低盐陆架水两类的,在两者的分界线上的认知也不一致。陆架水判据的不同对陆架水是否存在及其分布的研究结果上具有决定性影响,下一步研究中有待结合其他水团的示性特征,根据研究海区近期更为可靠的观测数据对这些与陆架水有关的问题给予明确的答案。

3.3 绕极深层水

作为南大洋分布最广的水团,在印度洋扇区内 CDW 大约占据水体总体积的 55% 以上,Smith 等^[7]界定其特征指标是: $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 2.0^{\circ}\text{C}$, $34.5 \leq S \leq 34.75$,而比较通用的指标是: $0.5^{\circ}\text{C} \leq T \leq 2.0^{\circ}\text{C}$, $34.5 \leq S \leq 34.75^{[8]}$ 。Gordon^[21]根据温度最大值和盐度最大值把 CDW 分为上、下两个核心:上层核心的温度范围为 $0.9 \sim 2.5^{\circ}\text{C}$,盐度范围为 $34.60 \sim 34.75$,深度

介于 250~600 m 之间;下层核心温度为 1.0~1.8℃,盐度为 34.60~34.75,深度介于 250~3 000 m 之间。

于洪华等^[22]利用中国第 9 次南极考察 CTD 资料,研究表明 CDW 在湾口西侧的 65°S 的涌升现象明显,最明显的深度为 50~200 m 层,暖水涌升将冬季冷水分割成南北两部分,并在其中形成孤立的暖水块。蒲书箴等^[23]研究结果表明,普里兹湾附近 CDW 主要位于陆坡及其以北海区,并主要在 100~2 000 m 之间从北向南扩展,其高温核($T>1.2^{\circ}\text{C}$)和高盐核($S>34.7$)在 75°E 断面上最为深厚,向南扩展得最远。

CDW 的涌升和向着陆架海域的南伸对南极底层水的形成有着重要的意义,同样也关系到南极表层水的北向扩展范围以及南极陆坡锋的强度和位置。

乐肯堂等^[14]基于 1989—1991 年两个航次的调查资料,以盐度 $S=34.57$ 作为其下界,认为 CDW 可以南进到 67°S 以南,并推断高温、高盐的 CDW 在某些情况下有可能扩展到普里兹湾陆架上。而实际上,如果严格按照 CDW 同时需要满足的温度指标来看,CDW 只能向南推进到 66.5°S 附近的陆坡附近,而变性较大的 CDW 的前沿混合水也只能影响到陆架上 67°S 左右^[24]。

Takashi 等^[25]对 1999—2000 年日本南极考察队在普里兹湾设置的西北—东南向断面资料分析认为,以 $-1.5\sim-1.7^{\circ}\text{C}$ 为暖舌边缘的变性 CDW 向陆架一侧可以影响到 67.5°S 附近,并与陆架水相混合产生盐度大于 34.6 的高密度水。这是目前唯一表明 CDW 向南可以伸展到普里兹湾陆架区域的证据,目前尚未在中国极地科考数据中发现此类证据。

3.4 南极底层水

南极底层水的形成问题是南大洋研究中人们最为关注的基本课题之一。AABW 是在南大洋底层广泛分布的低温高密度水,其示性指标为: $T<0^{\circ}\text{C}$, $34.60\leq S\leq 34.72$ 。长期以来威德尔海和罗斯海被认为是南极底层水的主要生成地^[26],而普里兹湾是否也有南极底层水生成是长期困扰中外极地研究者的一个问题。

早在 1937 年 Deacon^[3]就提出,低温的陆架水和高盐的绕极深层水混合后会形成一种密度较高的水团,这种水团沿大陆坡向下流动,在此过程中消散到各大洋的深渊中。Gordon^[27]和 Jacobs 等^[28]研究了普里兹湾附近海域陆架上底层水的形成过程,由此获得了南极底层水较高盐的变种。Gordon 和 Tchernia^[29]

探测到来自阿德雷海岸的低盐变种,推断其他若干海区(威尔克斯地海岸、恩德比地)有南极底层水生成或者对其生成有间接贡献。Williams 等^[30]利用冬季调查数据证实了在东南极阿德雷地有南极底层水生成,Ohshima 等^[31]基于锚碇观测数据和以象海豹为载体的观测资料,证实了在达恩利角冰间湖也有南极底层水生成。

实测到的陆架水和普里兹湾底层水盐度有时大于 34.62,这表明水团的密度足够大而使它能顺着陆坡流动到邻近的绕极深层水之下形成真正的南极底层水^[4]。Middleton 和 Humphries^[9]在 1982 年夏季的水文资料中发现陆架水 $S>34.56$,在这种情况下顺着陆坡的深水对流可以形成深水互侵层。蒲书箴和董兆乾^[5]根据中国南极第 15 次科考资料,在普里兹湾陆架上发现比同一次考察测得的南极底层水密度还要大的陆架水,并指出这一陆架水一旦越过附近的坡折,便可能沿着陆坡下沉,对 AABW 的形成有所贡献。

Nunes 和 Lennon^[15]根据 1985—1986 年锚碇浮标海流资料,认为这一海域海水的流动流向多变,但近底层存在明显的北向流动,这为陆架水越过陆架边缘的海槛,并最终形成底层水提供了可能;他们还指出埃默里冰架的存在有利于陆架上形成冰架水,这也有助于南极底层水的形成。

史久新和赵进平^[12]在总结 1995—2002 年中国南大洋水团研究进展时,明确指出,虽然普里兹湾海区存在显著的深层水涌升和陆架水北扩现象,某些年份深层水与陆架水混合后产生了较重的水体,但是尚未发现生成南极底层水的直接证据。

总体看来,回答普里兹湾是否有南极底层水生成这一问题,需要找到从普里兹湾湾底向陆坡外深水区 AABW 连续扩展的直接证据。

3.5 普里兹湾底层水

普里兹湾底层水的示性指标是 $T\leq 0^{\circ}\text{C}$, $S>34.62$,其特性介于陆架水和暖深层水之间,并认为是陆架水和暖深层水的混合水^[8]。如果根据前人关于高盐陆架水的界定,由于在普里兹湾内底层的水温偏低($T<-1.5^{\circ}\text{C}$)而盐度偏大($S>34.62$),则 PBBW 的指标完全涵盖在任意一种对高盐陆架水的示性指标界定范围中,即这一水团在湾内实际上属于高盐陆架水。

因此,陆架水的再划分问题同时还关系到普里兹湾底层水与陆架水在普里兹湾海域的区分问题。反

之亦然,对普里兹湾底层水形成过程及其研究意义的回答,也可以回答是否需要将陆架水再划分的问题。

普里兹湾底层水不同于南极底层水,两者之间最大的区别在于所处的位置和水深不同。前者位于普里兹湾及其陆架外缘的底层,一般位于 500~1 000 m 之间^[10],而后者位于陆坡以北深水海盆底层,一般位于 2 500 m 以深^[23]。由此可见,尽管通过 $T \leq 0^{\circ}\text{C}$, $S > 34.62$ 这一示性指标尚不能对两种底层水进行区分,但结合乐肯堂等^[10]和蒲书箴等^[23]对两种水团分布深度的限定,可以对 PBBW 和 AABW 进行明确区分和界定。

Middleton 和 Humphries^[9]提出普里兹湾底层水形成过程如下:在东风作用下,普里兹湾较宽陆架上的高盐陆架水($S > 34.6$)向西流动,由于陆架宽度向西变窄且陆架水的密度大于其下的绕极深层水,故向陆架外缘运动的陆架水必然获得向下的顺坡分量,使其与绕极深层水混合,于是形成普里兹湾底层水。

乐肯堂等^[10]从 1990—1993 年间共计 3 个航次的调查资料中发现,普里兹湾内仅在 1991 年 1 月有 PPBW 存在。

由此可见,从水团的成因上来看,陆架水(包括高盐陆架水)是在冬季寒风作用下,局地水体的降温与盐析过程形成的,而普里兹湾底层水则是陆架水与绕极深层水混合的结果,两者形成原因不同。从密度数值上看,普里兹湾底层水偏高,并有可能下沉到 900 m 处,为南极底层水形成创造了有利条件。

因此,在不区分高盐和低盐陆架水的前提下,可以通过符合 $T \leq 0^{\circ}\text{C}$, $S > 34.62$ 这一示性指标水团的具体位置进行陆架水、普里兹湾底层水、南极底层水的区分;也可以在明确区分陆架水和普里兹湾底层水示性指标的基础上,仅从其对南极底层水形成的意义上进行划分,而不再考虑其是否位于陆坡上还是陆架上。

实际上,在普里兹湾陆架底层存在的高密度水既可能是冬季高密度水的沉积,也可能是陆架水与从冰架附近海域流出的冰架水混合的结果,还可能是变性的绕极深层水涌上陆架与冰架水混合的结果;但无论是哪一种情形,只要这一水团可以越过陆坡或者从某些通道流向深海,就会和绕极深层水进一步混合,从而促进局地南极底层水的形成。鉴于普里兹湾湾口存在着若干通道,从这个意义上看,乐肯堂等^[14]关于普里兹湾底层水存在范围的论述要比 Middleton 和 Humphries^[9]所给出的更为合适。

3.6 冰架水

冰架水是南极独有的一种陆架水,其标志是温度低于在 1 个大气压下的结冰温度。位于普里兹湾南部的埃默里冰架是东南极最大的冰架,冰架下存在大范围的海水;受观测手段的限制,尚不能进入冰架下进行观测,目前在普里兹湾观测到的冰架水通常出现在埃默里冰架前缘部分站位的下层。

Smith 等^[7]认为在普里兹湾的埃默里冰架下存在着高盐低温水,它形成于冰架下热量的消耗与盐分的析出。早期董兆乾^[1]在普里兹湾发现的冰架水温度低于 -1.9°C ,并把冰架水这一低温的特性归于冰架下的冷却过程。普里兹湾特定的地形限制了冰架水与外部开阔海洋之间的相互交换,但却对滞留在湾内的深层水增强了上述效应。冰架水在冰架底部冷却,而结冰温度随着压力的增加而降低,目前在其他海域已经观测到温度低达 -2.4°C 的冰架水^[4]。

我国自第 19 次南极考察航次起开始对埃默里冰架前缘开展高密度的断面调查工作。基于这些调查数据,我国科学家开展了较为广泛的冰架水研究。陈红霞等^[32]指出 2003 年 1 月温度低于 -1.9°C 的冰架水较为广泛地出现在冰架前缘的中西部 500 m 以深海域。利用第 24 次南极考察数据,Ge 等^[33]发现几乎整个冰架前缘下层均为冰架水,冰架水最低温度低于 -2.0°C ,且在 75.5°E 附近的经向断面上冰架水向北可以扩展到位于 67.5°S 湾口附近。Zheng 等^[34]对近年来这一海域的相关数据分析表明:冰架水在埃默里冰架前缘的季节温跃层下呈块状存在,最冷的冰架水通常出现在冰架前缘断面的西侧,在 2003 年冰架水在 70.5°E 经向断面上曾扩展到陆坡附近,从而有机会与上升的绕极深层水直接混合形成底层水。Shi 等^[35]的研究结果进一步明确了温度低于当地冰点的过冷却水位于冰架前缘 63~271 m 深度范围内,与当地冰点相比较,最大过冷可达 0.16°C ;与周边的陆架水相比较,过冷水在垂向剖面上变化较小,这意味着过冷却水可能是从冰架下流出的水体因浮力涌升而形成的。

鉴于冰点与盐度呈非线性关系,前人并没有给出具体的 ISW 示性指标。为了在 T-S 平面上将 ISW 与其他水团区分,可以结合其他水团的示性特征,根据埃默里冰架水自身的特征,以满足在陆架深度范围内水温低于冰点为基础,给出冰架水示性特征的具体判据。

4 总结与讨论

综合前人对普里兹湾及其邻近海域水团研究结果可知,这一海区的水团主要有夏季表层水、冬季水、陆架水、绕极深层水、南极底层水、普里兹湾底层水、冰架水 7 种类型。以中国第 25 次南极考察获得的水文记录点聚图为基础,各水团的分布如图 2 所示。

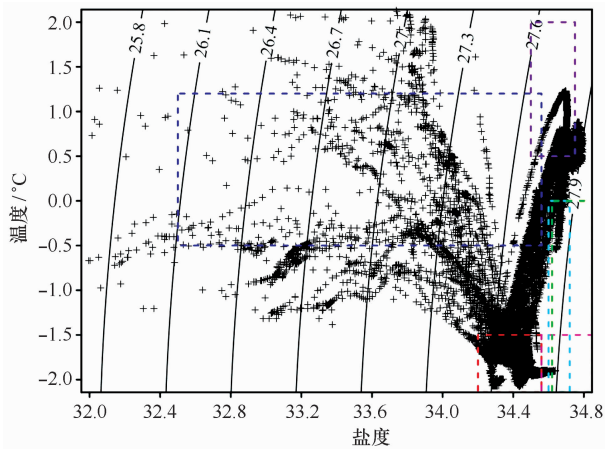


图 2 普里兹湾主要水团界定图

Figure 2 Definition diagram of the main water masses in Prydz Bay

蓝色虚线方框按夏季表层水指标给出,红色虚线方框按南极冬季水指标给出,洋红色虚线方框按陆架水指标给出,紫色虚线方框按绕极深层水指标给出,青色虚线方框按南极底层水指标给出,绿色虚线方框按普里兹湾底层水指标给出

The summer surface water is given in the blue dotted box, the Antarctic winter water is given in the red dotted box, the shelf water is circled by the magenta dotted box, and the purple dotted box is for the Circumpolar Deep Water, the blue dotted box for the Antarctic bottom water, the green dotted box for the Prydz Bay bottom water

历次考察均可识别的夏季表层水位于季节跃层之上,在 62°S 以南的海区广泛出现,示性指标统一,其厚度 30~50 m 不等。在普里兹湾内最大厚度出现在湾顶,在湾外深水区厚度较大且相对均匀(水深约 50 m)。

在南极冬季形成的冬季水位于夏季表层水与绕极深层水之间,广泛出现在开阔洋区,夏季海表增温难以影响到它。尽管在示性指标是一致的,但前人结合不同航次的资料,对冬季水的垂直范围认识差异较大;受 CDW 涌升的影响,冬季水在南极辐散带所在地最浅,仅为 60 m。

陆架水的成因与 WW 相同,两者最大区别在于:前者是残留在陆架海域的对寒冬的记忆,其下为陆

架;而后者是残留在开阔洋区对寒冬的记忆,其之下是绕极深层水;两者在物理性质和成因方面并无太大差别,而且均分布在夏季表层水之下。

前人对陆架水是否再划分为高盐陆架水和低盐陆架水以及相关的划分标准上的观点均存在较大争议。基于不同的判别标准,对普里兹湾陆架水在高盐陆架水还是低盐陆架水占优上也存在认识上的差异。这些争议有待结合其他水团的示性特征,根据研究海区近期更为可靠的观测数据,给予更为明确的答案。

CDW 的涌升和向陆架海域的南侵对南极底层水的形成有着重要的意义,同样也关系到南极表层水的北向扩展范围以及南极陆坡锋的强度和位置。目前唯一表明 CDW 向南可以伸展到普里兹湾的陆架区域的证据是日本南极考察队在普里兹湾设置的西北—东南向断面资料,但尚没有在中国极地科考数据中发现 CDW 向南可以伸展到普里兹湾的陆架区域的证据。

普里兹湾底层水被认为是陆架水和暖深层水的高密度混合水,对局地南极底层水的生成有重要意义。由于前人在高盐陆架水的认识上不尽一致,这直接影响到对普里兹湾底层水的界定及其空间分布认识。若仅以示性指标为准,普里兹湾底层水位于普里兹湾及其陆架外缘的底层,一般位于 500~1 000 m 之间,与南极底层水在分布范围上有着清晰的界限。

在普里兹湾观测到的冰架水通常出现在埃默里冰架前缘部分站位的下层,其相对于周边陆架水的低温和低盐特征形成于冰架下热量的消耗与冰架融水的加入,湾内特定的地形也有利于冰架水较为稳定存在。作为南极独有的冰架水,尽管其具体标志是明确的,但在普里兹湾内尚没有清楚的示性指标界定,因此在 T-S 平面上难以将冰架水与其他水团相区分。

普里兹湾是否有南极底层水生成是长期困扰中外极地研究者的一个基本问题。尽管实测到的陆架水和普里兹湾底层水有时密度足够大而使它能顺着陆坡流动到邻近的绕极深层水之下,陆架上形成的冰架水也有助于南极底层水的形成,普里兹湾湾口同时也存在有利于高密度水流出的深水通道,但目前尚没有发现在普里兹湾附近海域生成南极底层水的直接证据。

随着中国第 25 次南极考察 SBE 911plus CTD 装备到“雪龙”号考察船以来,在过去的 5 个跨年度南极航次里获得了迄今包括埃默里冰架前缘断面、普里兹

湾经向断面在内的质量更加可靠的第一手观测数据。下一步工作可以以这些高质量水文数据为基础,有望对新的水团识别、普里兹湾过冷水的时空分布、绕极深层水的陆架入侵、南极底层水能否在普里兹湾形成等问题的研究上获得新的认识,并为将来的研究和其他相关领域的工作提供参考。

参考文献:

- [1] 董兆乾. 南极普里兹湾海域夏季的水团和环流[C]// 南极考察论文集(第二集). 北京:海洋出版社,1984:1—24.
- [2] 郑少军,史久新. 南极普里兹湾邻近海域海冰生消发展特征分析[J]. 中国海洋大学学报,2011,41(7/8): 9—16.
- [3] Deacon G E R. The hydrography of the southern ocean[J]. Discovery Report,1937,15: 1—124.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Mosby H. The waters of the Atlantic Antarctic Ocean[M]. Scientific Results of the Norwegian Antarctic Expeditions,1934,1(131):1927—1928.
- [7] Smith N R,Dong Z Q,Kerry K R. Water masses and circulation in the region of Prydz Bay,Antarctica[J]. Deep-Sea Research Part A,1984,31(9):1121—1147.
- [8] Carmack E C. Water characteristics of the Southern Ocean south of the Polar Front[J]. A Voyage of Discovery,1977,24:15—61.
- [9] Middleton J H,Humphries S E. Thermohaline structure and mixing in the region of Prydz Bay,Antarctica[J]. Deep-Sea Research Part A,1989,36(8): 1255—1266.
- [10] 乐肯堂,史久新,于康玲,等. 普里兹湾区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.
- [11] 贺志刚,董兆乾,胡建宇. 2003 年夏季东南印度洋上层海洋的水文特征[J]. 极地研究,2003,15(3): 195—206.
- [12] 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.
- [13] 蒲书箴,董兆乾,胡筱敏,等. 普里兹湾海域夏季上层水及其北向运动[J]. 极地研究,2000,12(3): 157—168.
- [14] 乐肯堂,史久新,于康玲. 普里兹湾区水团和热盐结构的分析[J]. 海洋与湖沼,1996,27(3): 229—236.
- [15] Nunes Vaz R A,Lennon G W. Physical oceanography of the Prydz Bay region of Antarctic waters[J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers,1996,43(5):603—641.
- [16] Whitworth T,Orsi A H,Kim S J,et al. Water masses and mixing near the Antarctic slope front[J]. Antarctic Research Series,1998,75: 1—27.
- [17] Pu Shuzhen,Dong Zhaoqian,Hu Xiaomin,et al. Upper layer waters and their northward extention from Prydz Bay in summer[J]. Advances in Polar Science,2001,12(2): 89—98.
- [18] Shi Jiuxin,Dong Zhaoqian,Chen Hongxia. Progress of Chinese research in Antarctic physical oceanography in the Southern Ocean[J]. Advances in Polar Science,2013,24: 86—97.
- [19] Carmack E C,Foster T D. Water masses and circulation in the Weddell Sea[J]. Polar Oceans,1977: 151—163.
- [20] Fahrbach E,Peterson R G,Rohardt G,et al. Suppression of bottom water formation in the southeastern Weddell Sea[J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers,1994,41: 389—411.
- [21] Gorden A L. An Antarctic Oceanographic section along 170°E[J]. Deep-Sea Research,1975,22: 357—377.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 周培强,孙日彦. 南极普里兹湾海域水文特征研究[J]. 青岛海洋大学学报,1995,25(4): 445—452.
- [25] Takashi Y,Toshio S,Kimio H,et al. Possible source of the Antarctic Bottom Water in the Prydz Bay region[J]. Journal of Oceanography,2006,62:649—655.
- [26] Orsi A H,Johnson G C,Bullister J L. Circulation,mixing,and production of Antarctic Bottom Water[J]. Progress in Oceanography,1999,43(1): 55—109.
- [27] Gordon A L. Oceanography of Antarctic waters[M]. American Geophysical Union,1971.
- [28] Jacobs S S,Geori D T. Observations on the southwest Indian/Antarctic Ocean[J]. Deep-Sea Research,1977,24: 3—84.
- [29] Gordon A L,Tchernia P L. Water of the continental margin off Adelie coast,Antarctica[J]. Antarctic Research Series,1972,19: 59—69.
- [30] Williams G D,Aoki S,Jacobs S S,et al. Antarctic Bottom Water from the Adélie and George V Land coast,East Antarctica (140—149°E)[J]. Journal of Geophysical Research,2010,115(C4).
- [31] Ohshima K I,Fukamachi Y,Williams G D,et al. Antarctic Bottom Water production by intense sea—ice formation in the Cape Darnley polynya [J]. Nature Geoscience,2013,6(3): 235—240.

- [32] 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.
- [33] Ge R F,Dong Z Q,Chen H X,et al. Marine hydrographic spatial—variability and its cause at the northern margin of the Amery Ice Shelf[J]. Advances in Polar Science,2011,22(2): 74—80.
- [34] Zheng S J,Shi J X,Jiao Y T,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.
- [35] Shi J X,Cheng Y Y,Jiao Y T,et al. Supercooled water in austral summer in Prydz Bay, Antarctica[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,2011,29(2): 427—437.

Study on water masses in Prydz Bay and its adjacent sea area

Chen Hongxia^{1,2}, Lin Lina^{1,2}, Shi Jiuxin³

(1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 2. *Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 3. *College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract: The Prydz Bay and its adjacent sea area is a key, well-studied area for investigating the southern ocean carried by CHINARE all the time. This work studied on the distribution and characteristics of the main water masses such as the Summer Surface Water, the Antarctic Winter Water, the Shelf Water, the Circumpolar Deep Water (CDW), the Antarctic Bottom Water (ABW) and the Ice Shelf Water, and summarized results of previous studies on water mass which were based on survey data in these areas. The results showed that on the definition of the index characteristic of the Shelf Water, there are still in debate that whether the shelf water is subdivided into High Salinity Shelf Water and Low Salinity Shelf Water, and there exists some overlaps between the defining scopes of High Salinity Shelf Water and the Prydz Bay Bottom Water. Until now, there is no evidence that CDW can be extended to the continental shelf areas of the Prydz Bay, and no direct evidence that ABW can be formed around the Prydz Bay.

Key words: the Prydz Bay; the Southern Ocean; characteristic indexes; Antarctic Bottom Water