



中国极地科学考察研究三十年进展

循环、作用和影响： 南大洋观测与研究

XUNHUAN, ZUOYONG HE YINGXIANG:
NANDAYANG GUANCE YU YANJIU

张海生 主 编



海洋出版社

中国极地科学考察研究三十年进展

循环、作用和影响： 南大洋观测与研究

张海生 主编

海洋出版社

2018年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

循环、作用和影响: 南大洋观测与研究/张海生主编. —北京: 海洋出版社, 2018. 12
ISBN 978-7-5210-0289-8

I. ①循… II. ①张… III. ①南大洋-海洋监测 IV. ①P717.81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 297273 号

责任编辑: 白 燕

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京文昌阁彩色印刷有限责任公司印刷 新华书店北京发行所经销

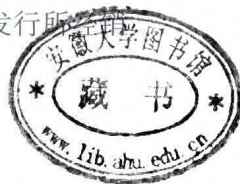
2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

开本: 889mm×1194mm 1/16 印张: 17

字数: 453 千字 定价: 150.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换



总序

今年是我国开展南极考察研究 30 周年纪念。与发达国家和一些南半球国家相比，我国开展南极考察比较晚。但无数中国极地科学家不畏艰险，胼手胝足，使得我国极地研究获得许多令人振奋的高水平科研成果。台站、基地、船舶建造和固定翼飞机发展迅速，青年俊杰大量涌现，中国极地考察研究事业蒸蒸日上。

对于行星地球而言，极地是研究全球气候变化最理想的地理单元，中国科学家很早就开始关注极地的考察研究。从 20 世纪 30 年代起，中国就陆续出版有关南极方面的文献书籍介绍南极知识。在国际地球物理年期间（1957—1958 年），全国 10 多种报纸杂志刊载了许多关于各国南极考察、科学研究以及科普方面的文章和消息。中国科学院副院长竺可桢教授当年也向中央建议：“中国是一个大国，要研究极地，并建议中国派出学习极地专业的留学生。”谢自楚教授就是根据这个建议被派到俄罗斯莫斯科大学学习极地冰川专业。国家海洋局于 1977 年提出了“查清中国海、进军三大洋、登上南极洲”的规划目标。曾呈奎教授在 1978 年初给方毅副总理写信建议：“中国作为一个拥有世界 1/4 人口的大国，理应积极参加南极考察，为将来两极资源的开发利用准备条件。”方毅副总理于同年 6 月 26 日批示：“南极考察是一个大项目，由国家海洋局研究实施。”国家海洋局于当年 5 月向国家科学技术委员会（以下简称“国家科委”）提交了《关于开展南极考察工作的报告》。当年 10 月国家海洋局又向国务院提交了《关于开展南极考察工作》的请示报告。国务院领导批阅同意后，经国家科委与有关部门多次商量，又于 1981 年 1 月正式向国务院提交了《关于成立国家南极考察委员会的报告》。国务院于当年 5 月 11 日正式批准成立国家南极考察委员会（以下简称“南极委”）。南极委属国务院领导，国家科委副主任武衡担任南极委主任委员，外交部副部长章文晋等 5 人担任南极委副主任委员，其他 15 名委员分别来自各相关部委和海军。

国家科委赵东宛副主任于 1979 年 4 月 12 日批示，“拟同意先派少数几位专家和友好国家合作，乘他们的船去南极考察，这样花钱少，又可取得经验”。经方毅副总理批示，国家海洋局上报国务院批准后，我国从 1980 年起就开始派团出访，邀请外国南极学者来华交流，并有计划地选派了 40 多人次的科技人员前往外国的南极科学考察站、考察船和其国内南极研究机构进行科学考察，获得了南极亲身经历，学到了经验，为我国独立组织南极考察队打下了基础。

1984 年，在国家海洋局南极考察办公室郭琨主任的率领下，中国终于踏上南极洲的土地，开始建设长城站并实施考察。1999 年，国家海洋局组织了北极综合科学考察。

冰过程所导致的水团性质变化及南极冰架下的过冷作用主宰着南大洋向各大洋输入冷水的深层混合和热盐对流的过程。南大洋海冰覆盖区, 大气与海洋间的气体交换对全球大气的循环, 特别是大洋深层的翻转起到核心作用, 引起水团形成多样性的大洋深层温度、盐度和溶解气体在全球气候变化中起到重要的反馈作用。正是由于南大洋在地球系统和全球变化中的重要作用, SCAR 在大力推动在南极地区开展和实施各项研究计划的基础上, 于 2010 年重点提出了南大洋观测系统 (The Southern Ocean Observing System, SOOS) 的研究计划, 以更深入地了解 and 揭示南大洋变化的主要特征、控制因素、响应与反馈, 以及加强对未来变化的预测。

我国自 1984 年开展首次南极考察以来, 迄今已进行了 30 次南极考察活动。其中, 南大洋作为历次考察的主要内容, 有力地推动了我国南大洋研究的开展。自“八五”规划实施以来, 我国立足全球变化, 制定并实施了多项针对南大洋的考察与研究计划。围绕“南大洋环流与水团变异”、“生物地球化学循环与碳通量”、“南大洋生物生态学”、“南极海冰观测与研究”、“海-冰-气相互作用”等, 以普里兹湾及其临近海区为重点调查区域, 进行了长期固定断面的调查, 使我国成为这一地区掌握资料最全面的国家之一。20 多年来, 我国科学家在南大洋研究领域取得的科研成果已经开始引起世人的瞩目, 在某些领域已迈入国际前沿, 并取得了重大的研究成果。如在南极大磷虾基础生物学研究上, 解决了困惑国际学术界多年的大磷虾年龄判断指标问题, 及用磷虾体长与眼径比率作为检测南大洋生态系统动态变化的指示因子; 利用资料的优势, 我国学者在普里兹湾及其以北洋区的水团和环流研究作出了与国际水平可比的重要贡献, 不仅揭示了南极布兰斯菲尔德海峡的东海盆和中心海盆深层水和底层水的来源, 而且发现了全球气候变化的最强信号出现在南大洋, 进一步揭示了全球变暖已经减缓了南大洋的基本过程, 垂向反转环流、水团特性、海盆间水交换、与低纬度海洋的水交换和海冰等均发生明显变化, 且发现这些变化与全球大洋热盐环流和 ENSO 等具有紧密的关系, 引起国际学术界的高度重视。另外, 在跨越绕极流的 73°E 断面累计了近 10 年的 XBT 和 XCTD 资料, 该断面已被国际 CLIVAR 计划列为一个长期监测断面, 纳入 CLIVAR 国际计划的监测系统; 在南大洋海冰研究方面, 利用卫星遥感海冰资料, 我国科学家开展了一系列针对南大洋海冰季节变化、年际变化和区域性分布特征的研究活动。并在研究南极海冰自身变化规律的同时, 还结合其他资料, 对南极海冰变化与地球气候系统其他子系统的变化, 特别是与中国气候的关系进行了研究; 南大洋是全球典型的高营养盐低生产力地区, 也是全球 CO₂ 的主要汇所, 可吸收高达全球海洋吸收人类排放 CO₂ 总量的 40%。这一显著特征使之成为全球变化研究一直关注的重点。自首次南大洋考察以

来,我国持续开展了南大洋生物地球化学的研究。重点对南大洋普里兹湾及印度洋伞区相邻海域的 C、N、S、P、Si 等生源要素的生物地球化学循环进行了深入的探讨,揭示了该区域主要生源要素生物地球化学的作用特征和行为方式,建立了海洋 C 循环和 C 通量估算的技术和方法,对极区 C 循环的变化及其气候效应作出了初步的评估,对全球气候预测模式的优化提供了重要的依据。在开展上述研究的同时,我国还对南大洋生物生态学、海洋渔业资源、地质地球物理等方面进行了广泛与专项的研究,为深入开展南大洋科学研究奠定了良好的基础。

本书汇集了我国 30 年南大洋考察与研究的主要成果,反映了我国南大洋研究的重大进展,同时也展示了我国长期从事南大洋科学研究的各位科学家对我国极地事业作出的重大贡献。环境与资源已成为制约全球社会发展的重大瓶颈。南极独特的环境和丰富的资源为维系人类社会的发展提供了广袤的空间。我们相信,这些重要研究成果的取得,对促进我国南大洋科学研究的深入开展,提升我国极地科学研究的水平,推动我国极地事业的发展必将发挥重要的作用。

张海生

2018 年 2 月

目 录

第 1 章 物理海洋学考察与研究	(1)
概述	(1)
1.1 南大洋物理海洋学观测	(1)
1.2 南大洋物理海洋学研究	(3)
1.3 南大洋物理海洋学主要研究成果	(4)
1.3.1 普里兹湾及其邻近海域研究进展	(4)
1.3.2 南极半岛邻近海域研究进展	(11)
1.3.3 南极绕极流研究进展	(13)
1.4 结语与展望	(17)
参考文献	(18)
第 2 章 海冰观测与研究	(22)
概述	(22)
2.1 南大洋海冰观测	(23)
2.1.1 船基观测	(23)
2.1.2 固定冰观测	(25)
2.2 南大洋海冰科学研究	(30)
2.3 南大洋海冰科学研究重要进展	(31)
2.3.1 南极固定冰物质平衡过程	(31)
2.3.2 南极固定冰反照率变化特征及其影响因子	(39)
2.3.3 南极海冰航空遥感观测研究	(40)
2.3.4 东南极普里兹湾海冰厚度观测研究	(43)
2.3.5 冰区遥感和导航服务	(47)
2.3.6 区域海冰-海洋耦合模式发展及其应用	(48)
2.4 结语与展望	(57)
参考文献	(57)
第 3 章 化学海洋学考察与研究	(61)
概述	(61)
3.1 南大洋化学海洋学考察	(61)
3.2 南大洋化学海洋学研究	(62)
3.3 南大洋化学海洋学研究的重要进展	(64)
3.3.1 海水营养盐结构和深层水颗粒物通量	(64)
3.3.2 南大洋 CO ₂ 研究	(73)

3.3.3 南大洋 N_2O 研究	(77)
3.3.4 海洋同位素观测研究	(82)
3.3.5 南极海洋气溶胶研究	(89)
3.4 结语与展望	(98)
参考文献	(98)
第4章 生物海洋学考察与研究	(105)
概述	(105)
4.1 南大洋生物海洋学科学考察	(106)
4.2 南大洋生物海洋学科学研究	(107)
4.3 南大洋生物海洋学研究的重要进展	(108)
4.3.1 叶绿素 a、初级生产力及浮游植物研究进展	(108)
4.3.2 微微型浮游生物群落特性及水团指示	(114)
4.3.3 南极磷虾生物生态学研究	(120)
4.3.4 南大洋普里兹湾夏季浮游动物群落结构的年际变动	(126)
4.3.5 南大洋浮游动物摄食生理生态学	(134)
4.3.6 南极底栖生物	(141)
4.4 结语与展望	(145)
参考文献	(146)
第5章 生物资源考察与研究	(150)
概述	(150)
5.1 我国南极磷虾资源调查与研究	(150)
5.2 我国南极鱼类的生态适应和基因组进化研究	(151)
5.3 南大洋生物资源考察	(155)
5.3.1 南极磷虾资源考察	(155)
5.3.2 南极海洋微生物考察	(156)
5.4 南大洋生物资源研究	(156)
5.4.1 南极磷虾资源研究	(156)
5.4.2 南极鱼类低温适应机制和基因组进化研究	(157)
5.4.3 南极海洋微生物资源及其利用潜力研究	(158)
5.5 我国南极海洋生物资源调查与研究重要进展	(159)
5.5.1 我国南极磷虾资源调查与评估重要进展	(159)
5.5.2 我国南极鱼类的生态适应和基因组进化研究重要进展	(162)
5.5.3 南极海洋微生物资源及其利用潜力研究重要进展	(163)
5.6 结语与展望	(171)
5.6.1 南大洋磷虾资源调查与评估展望	(171)
5.6.2 南极鱼类的生态适应和基因组进化研究展望	(172)
5.6.3 南极海洋微生物资源及其利用潜力研究展望	(172)
5.6.4 结语	(173)

参考文献	(173)
第6章 海洋地质学考察与研究	(179)
概述	(179)
6.1 南极海洋地质考察	(179)
6.2 南极海洋地质研究	(182)
6.3 南极海洋地质研究的重要进展	(183)
6.3.1 南极半岛附近海域表层沉积物的研究及其环境指示意义	(183)
6.3.2 南极半岛附近海域的沉积记录与古环境演变	(188)
6.3.3 南极普里兹湾表层沉积物研究及其环境意义	(192)
6.3.4 南极普里兹湾的沉积地球化学记录与古环境演变	(197)
6.4 结语与展望	(201)
参考文献	(202)
第7章 海洋地球物理考察与研究	(206)
概述	(206)
7.1 海洋地球物理考察	(206)
7.1.1 德雷克海峡地球物理考察	(206)
7.1.2 长城湾水深测量	(207)
7.1.3 环球重力测量	(207)
7.1.4 布兰斯菲尔德海峡地球物理考察	(208)
7.1.5 普里兹湾地球物理考察	(210)
7.1.6 罗斯海地球物理考察	(211)
7.2 海洋地球物理研究	(213)
7.2.1 海底地形地貌研究	(213)
7.2.2 海洋地震地层研究	(216)
7.2.3 海洋重磁异常研究	(219)
7.3 海洋地球物理研究的重要进展	(223)
7.3.1 德雷克海峡扩张年代和过程	(223)
7.3.2 布兰斯菲尔德海峡沉积盆地构造发育史	(225)
7.3.3 普里兹湾陆缘构造特征	(226)
7.3.4 南极周边板块运动历史和古水深演化	(227)
7.4 结语与展望	(228)
参考文献	(233)
第8章 海洋气象观测与预报保障	(235)
概述	(235)
8.1 南极航线气象预报保障	(235)
8.1.1 早期气象保障工作及海洋气象观测设备更新	(235)
8.1.2 卫星遥感图像接收处理	(237)
8.1.3 南极考察航线水文气象环境背景	(237)



8.1.4	南极考察航线选择及预报	(239)
8.1.5	南大洋和南极气旋活动对南极考察航线影响分析	(240)
8.2	南极航线海冰预报保障	(249)
8.2.1	南极走航海冰观测	(249)
8.2.2	南极航线海冰预报	(249)
8.3	南极航线预报保障的重要进展和展望	(252)
8.3.1	南极航线预报保障的成功范例	(252)
8.3.2	南极航线天气预报技术研究	(253)
8.3.3	南极航线海冰和海洋环境预报技术发展	(254)
8.4	结语与展望	(254)
	参考文献	(255)
	编后记	(256)

第1章 物理海洋学考察与研究

概述

物理海洋学是中国极地科学体系中最早开展研究的学科之一，甚至早在中国派船奔赴南极进行现场考察之前，南大洋物理海洋学研究工作就已经开始了。在20世纪80年代初，中国科学家通过参与国际合作，开展了南大洋水团与环流的研究（董兆乾等，1984；苏玉芬和董兆乾，1984；Smith et al., 1984）。从1984年中国首次南极科学考察开始，在所有由考察船执行的南极考察中，南大洋综合海洋调查都被作为重点内容之一。早期的海洋观测集中在长城站周边的南极半岛邻近海域；1989年在东南极建立中山站后，在中山站所处的普里兹湾及其邻近海域布设了较为固定的站位，进行海洋学综合观测，迄今已经积累了时间跨度超过20年的CTD（温盐深仪）观测资料，中国也成为在该海区从事现场观测和科学研究的主要国家之一。相应地，中国在南大洋开展的物理海洋学研究也较多地关注普里兹湾和南极半岛邻近海域的水团、锋面与环流的空间特征和时间变化。除此之外，利用其他国家的南大洋现场考察数据、卫星遥感数据和漂流浮标数据，中国学者还开展了遍及整个南大洋的研究；利用解析和数值模式，研究了以南极绕极流为重点的南大洋环流的机理和变化。本章总结30年来中国学者在南大洋物理海洋学研究中所取得的成果，以求为将来的研究和其他相关领域的工作提供参考。

1.1 南大洋物理海洋学观测

中国对南大洋开展物理海洋学观测，始于20世纪80年代，最初是通过国际合作而开展的。1980年1—3月，国家海洋局第二海洋研究所的物理海洋学者董兆乾前往澳大利亚的南极凯西站进行考察和访问，航渡期间进行了站区海湾和南极辐合带的海洋表层温度测量、海况和海冰观测，这是中国科学家第一次在南大洋进行现场观测。翌年的南极夏季，董兆乾又参加了澳大利亚“首次国际南极海洋系统和储量的生物调查试验（FIBEX）”的现场考察，在“内拉丹”号考察船上，使用CTD和抛弃式温深仪（XBT）进行定点和走航观测，获得了52个站位的CTD资料和155个XBT资料。董兆乾同澳大利亚科学家合作承担了“南极普里兹湾的物理海洋学特征”的研究课题，合作发表了《普里兹湾海域水团与环流》的研究论文（Smith et al., 1984）。1982年5月，国家海洋局第二海洋研究所设立了由37人组成的“南极样品分析研究”课题组，由董兆乾任组长，分析研究从南极考察中获得的数据和样品，研究成果汇编出版为《南极科学考察论文集》。1985年2—3月，国家海洋局第二海洋研究所的物理海洋学者苗育田，应邀参加美国“极星”号破冰船的威尔克斯地近海考察。在这个从未考察过的海域，完成了7个断面86个站位的直达海底的CTD观测，并发表了研究论文（苗育田和于洪华，1987）。

1984 年开展的中国首次南极科学考察,终于为中国科学家提供了在自己的考察船上开展南大洋现场观测的机会。1985 年 1—2 月,在“向阳红 10”号考察船上,以金庆明为队长的来自国内 16 个单位的 74 名科技人员组成了南大洋考察队,完成了以南设得兰群岛周围海域和别林斯高晋海东北部海域为重点的综合海洋调查,历时 24 d,测线总长 3 115 km。其中以赵金三为组长的水文组(18 人)完成了 34 个站位的 CTD 观测和 62 个测点的 XBT 观测,并且使用国产印刷海流计进行了两个站的海流定点测量,使用国产抛弃式波浪仪进行了海浪观测。作为中国首次南极考察的成果,国家南极考察委员会出版了《南大洋考察报告》(获国家科技进步二等奖)和《中国第一届南大洋考察学术讨论会论文集》。从中国第 3 次南极考察开始,启用“极地”号考察船进行南大洋考察。1987 年 1—2 月,对南设得兰群岛海域进行调查,完成了 28 个站位的作业。1987 年夏季在长城站前的海湾布放了水位计和温度计,进行了长达一年的验潮观测和海底水温观测,这是中国第一次在南极海域开展周年锚碇海洋观测。

1989 年南极中山站建成后,中国南大洋考察的重点转到印度洋扇区的普里兹湾海域。除了在考察船走航观测和在长城站附近所做的少量观测(杨玉玲和黄凤鹏,1997)外,大多数固定站位的海洋观测均集中于此。自 1990 年中国第 6 次南极考察开始,由考察船(从 1994 年开始改用“雪龙”号船)执行的南极考察都在普里兹湾的经向断面上开展综合海洋调查(侍茂崇等,1995a),至今已积累了时间跨度超过 20 年的 CTD 断面观测资料(图 1-1),中国已经成为该海域开展现场观测次数最多和积累资料数量最多的国家。中国早期在普里兹湾的经向断面覆盖了较大的区域,如第 7 次南极考察在 $68^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$ 之间设置了 9 条经向断面,其最北端的站位在 62°S ,第 9 次南极考察则将调查区域东扩至 58°E 。从第 13 次南极考察(1997 年 1 月)开始,观测区域进一步缩小到 $68^{\circ}\sim 78^{\circ}\text{E}$ 之间的海域,并在陆坡区设置了加密站位,以期观测到水团和环流的更多细节。在后来的考察中,经向断面的位置逐步固定下来,基本上每隔 2.5° 设置一条断面,通常设置 70.5°E 、 73°E 、 75.5°E 和 78°E 共 4 条经向断面。其中的 73°E 恰好穿过普里兹湾口的海槽,这里是海冰较少的区域,适合开展海洋观测;而海槽的左右两侧的弗拉姆浅滩和四女士浅滩,即使在夏季也常有海冰盘踞和堆叠,形成难以逾越的冰舌,阻碍考察船完成断面观测。因此,在 73°E 断面上积累了最多航次的完整断面观测数据,逐渐成为中国在普里兹湾观测的主断面。最初在普里兹湾的几次考察是配合磷虾资源调查而开展的,因此观测的深度局限于 1 000 m 甚至更浅,后来的航次开始关注底层水的观测,因而多数是全深度的观测。自 2003 年第 19 次南极考察开始,沿着普里兹湾内的埃默里冰架前缘设置了海洋观测断面,开始进行冰架-海洋相互作用研究。2013 年进行第 29 次南极考察时,增设了位于普里兹湾口的纬向断面,以便更细致地观测湾内外的水交换情况。

除了停船观测,在考察船往返中国与南极之间,还开展了各种走航观测。通常,表面温盐和走航 ADCP(多普勒海流剖面仪)的观测是全航程的,而 XBT(抛弃式温深仪)/XCTD(抛弃式温盐深仪)的观测多安排在跨越西风带时进行。XBT/XCTD 的观测主要在两个位置:一是澳大利亚的弗里曼特与南极普里兹湾之间(大体上沿 115°E);二是南美洲与长城站之间,即横跨德雷克海峡的断面。第 9 次南极考察由新西兰中转前往长城站时,也曾开展过 117°W 的 XBT 观测,对该断面的锋面和温度结构进行了分析(苗育田等,1995b;1996)。由中美合作研究项目支持,于世纪之交前后的 10 年间,在澳大利亚和普里兹湾之间开展了沿航线的高密度 XBT/XCTD 走航观测,对东南印度洋锋面及其年际变化进行了长期观测和分析。

近年来,一些新的观测方式得以开展,例如,采用直升机空投 XCTD 对埃默里冰架前缘冰间湖进行现场观测(Shi et al., 2011b),利用冰基自动剖面仪对中山站外沿岸固定冰下的上层海洋进行连续观测(矫玉田等,2010),通过漂流浮标观测普里兹湾表层流场,布放锚碇潜标在普里兹湾进

行长期观测, 取得了更加丰富的南大洋物理海洋学观测数据。

2012年1月, 在阔别25年之后, 中国考察船再次进入南设得兰群岛海域, 开展海洋调查。自2012年正式启动的“南北极环境综合考察与评估专项”, 将普里兹湾及其邻近海域和南极半岛北端周边海域确定为两个重点调查区域, 持续开展综合海洋调查。

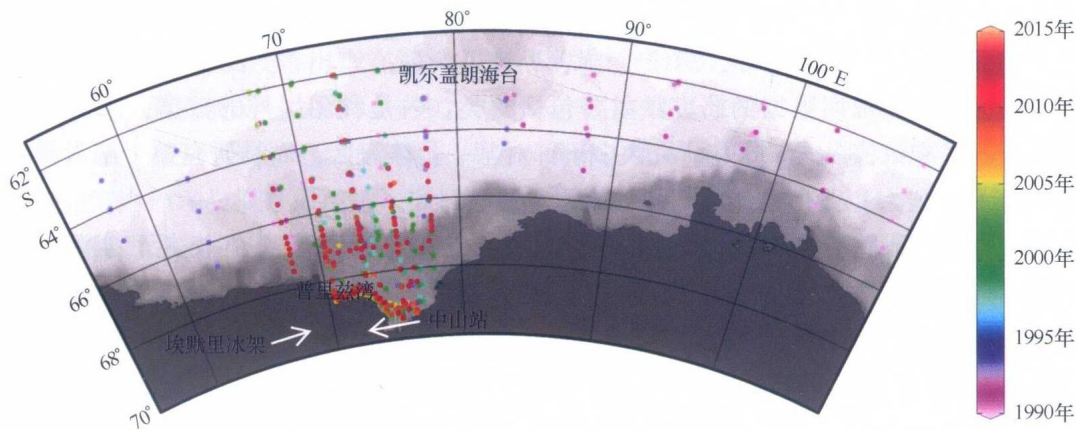


图 1-1 1990—2013 年中国南极考察在普里兹湾及邻近海域的 CTD 观测站位
圆点的颜色表示开展观测的年份

1.2 南大洋物理海洋学研究

中国学者在南大洋开展的物理海洋学研究工作, 大部分是利用中国南极考察队在南大洋开展现场观测所获取的资料。这类研究的地理区域自然会限制在中国考察船所能到达的海域, 由于中国在南极先后建立了两个沿岸考察站, 即长城站和中山站, 中国的物理海洋学研究也相应地集中在这两个考察站的周边海域。

长城站位于南设得兰群岛中的乔治王岛, 其周边海域主要包括德雷克海峡和布兰斯菲尔德海峡。中国对于该海区的研究, 集中在 20 世纪 80 年代, 主要是利用中国第 1 次和第 3 次南极考察在该海区获得的现场考察数据, 分析水团和环流的结构 (羊天柱等, 1989; 许建平等, 1989)。后来也曾通过国际合作, 利用国外的考察资料对布兰斯菲尔德海峡的深层水团做过更加深入和细致的研究 (董兆乾等, 2004)。考察船在往返长城站和南美洲之间可以通过开展走航观测获得实测数据, 利用这些数据并辅以国外的资料, 德雷克海峡中的锋面研究也得以开展 (李金洪, 1991; 蒲书箴等, 1996)。这一海区的另外一项研究则基于对长城站前海湾水温和水位的周年连续观测, 分析了海温的变化和潮汐特征 (孙洪亮, 1990; 1991)。

随着中山站的建立, 从 1990 年开始, 中国的南大洋重点调查海域移到印度洋扇区的普里兹湾。20 多年以来, 基于现场观测数据的中国物理海洋学研究集中在这个海区, 开展的研究早期多为水团组成和环流结构 (董兆乾等, 1984; 乐肯堂等, 1996), 后来更多地关注具体的陆架与海盆水交换 (蒲书箴等, 2000; 高郭平等, 2003a) 以及冰架-海洋相互作用过程 (Zheng et al., 2011)。普里兹湾的南极底层水形成问题, 一直是这一海区最为关注的科学焦点。围绕这一问题, 中国学者做了很多努力。但是, 仍旧没有获得最终的答案。埃默里冰架作为东南极最大的冰架, 对普里兹湾的海洋过程也有重要的影响。这一科学问题在最近的 10 年受到中国学者的关注, 尤其是在沿着冰架前缘

建立了海洋观测断面之后 (Shi et al., 2011a)。在普里兹湾以北的绕极流区, 虽然中国考察船几乎没有停船观测过, 但是通过在走航观测也获得了上层温盐和海流的实测数据。通过分析这些数据 (侍茂崇等, 1995b), 并结合国外观测数据和卫星遥感数据 (He et al., 2006), 开展了南印度洋锋面和环流的研究。这方面的研究也逐渐深入到年际变化和变化机制方面的探讨 (贺志刚和董兆乾, 2006; He and Dong, 2010)。在中山站邻近海域还进行了验潮观测 (鄂栋臣和黄继峰, 2008), 分析了该海域的潮汐特征 (黄继峰等, 2012)。

不依赖于中国南极考察数据的研究, 主要包括两类: 一是利用国外的数据; 二是开展模式研究, 包括理论模式和数值模式。这些研究大多不针对某一具体海区, 而是研究整个南大洋, 特别是南极绕极流。

用于南大洋环流研究的国外数据, 包括遥感 (主要是卫星高度计)、再分析和实测数据。卫星高度计数据可以用于与海流关系密切的海面高度分析 (周琴等, 2003), 也可以反演流速 (张子占等, 2008), 并能够通过建立地转经验模型, 估算出温度、盐度和流速的垂向结构 (Zhang and Sun, 2012)。对再分析数据的分析则给出了与南极绕极流的斜压性相关的变化过程 (杨小怡等, 2008)。随波逐流的表面漂流浮标和 Argo 浮标可以得到覆盖整个南大洋的海洋实测数据, 对这些数据的分析给出了南极绕极流空间特征 (Gao et al., 2014) 和混合特性 (Wu et al., 2011) 的新认识。

通过建立理论模型研究南大洋环流, 一直是中国学者对南极绕极流进行理论分析的一条途径 (董昌明和袁业立, 1996; 张庆华等, 2003; 巢纪平和李耀锟, 2011), 这一研究兴趣源自东西贯通的南极绕极流对局限于海盆内的传统大洋环流理论提出的挑战。数值模式方面, 既有对整个南大洋的数值模拟 (史久新等, 2002; 2003), 也有针对局地区域的数值模式 (侍小兵等, 1995; 孙澈等, 1995; 史久新等, 2000a)。但是, 最近几年鲜有南大洋环流数值模式方面的研究报道, 这方面的研究有待加强。

1.3 南大洋物理海洋学主要研究成果

1.3.1 普里兹湾及其邻近海域研究进展

中国在普里兹湾开展的物理海洋学研究主要包括两个方面的内容: 一是普里兹湾及其邻近海域的水团与环流; 二是从澳大利亚至南极之间的东南印度洋锋面结构。自 1990 年开始, 中国南极考察队在普里兹湾设置了观测断面, 积累了丰富的海洋学观测数据, 为开展水团和环流研究奠定了基础。中国南极考察队在往返南极途中, 利用走航投放 XBT/XCTD 探头的方式获得了纵贯南大洋若干断面的温度和盐度资料, 这些资料成为研究南大洋锋面的主要依据。

普里兹湾及其邻近海域以陆坡为界, 分为陆架和海盆两个区域。夏季, 普里兹湾陆架上层为暖而淡的夏季表层水, 下层为冷而咸的陆架水 (SW), 在靠近埃默里冰架前缘附近还有更加低温的冰架水 (ISW); 海盆区, 南极表层水 (AASW) 之下有低温的冬季水 (WW), 再下层是较暖的绕极深层水 (CDW), 海盆区的底层常可以发现温度在 0°C 以下的南极底层水 (AABW)。上述主要水团的温盐特性如图 1-2 所示。通常认为南极近岸区域存在向西的沿岸流, 海盆区则主要被东向运动的南极绕极流 (ACC) 所占据, 前者明显强于后者, 两者之间为多涡结构的南极辐散带, 普里兹湾内存在闭合的气旋式流涡。南大洋的锋面大体上与纬圈平行, 从北至南一般包括: 亚热带锋 (STF)、亚南极锋 (SAF)、极锋 (PF)、南极绕极流南部锋 (SACCF) 和陆缘水边界 (CWB, 又称南极陆

坡锋, ASF)。

1.3.1.1 夏季表层水的空间变化特征

普里兹湾内表层水随纬度变化的反常分布受到关注。湾内表层水的厚度随纬度增加而增加,即南厚北薄(董兆乾等, 1984), 夏季表层水的最大厚度常出现在普里兹湾的湾顶(赵松鹤和陈明剑, 1995); 而表层水的最高温度常出现在海湾西南部的埃默里冰架外海, 形成了随纬度升高, 水温也升高的反常分布(董兆乾等, 2004)。1992 年夏季, 在埃默里冰架以东海域观测到超过 5°C 的高温表层水(孙日彦, 1994)。孙日彦(1994)认为, 海冰分布的空间差异、夏季融冰区特有的弱垂向混合和较弱的湾内外水交换是形成这一区域高温表层水的原因。随着埃默里冰架前缘断面的设立和持续观测, 冰架前缘断面的表层水温盐结构也日益得到重视。2006 年 1 月观测到表层水温度存在东西方向不均匀的特征, 蒲书箴等(2007b)将该现象归因于浮冰和冰间湖的分布。2008 年的夏季观测到了东暖西冷且东淡西咸的表层水温盐分布, 但东侧的暖水温度较 2006 年的低, 且出现于次表层(Ge et al., 2011)。这一次表层的暖水在 2011 年 1 月也出现于东侧(严金辉等, 2012)。考虑到冰架前缘海域的海冰分布和环流结构的复杂性, 以及各年度观测时间的季节内差异, 这里的表层温盐结构有待于将来利用卫星遥感等数据进行更加细致的分析。

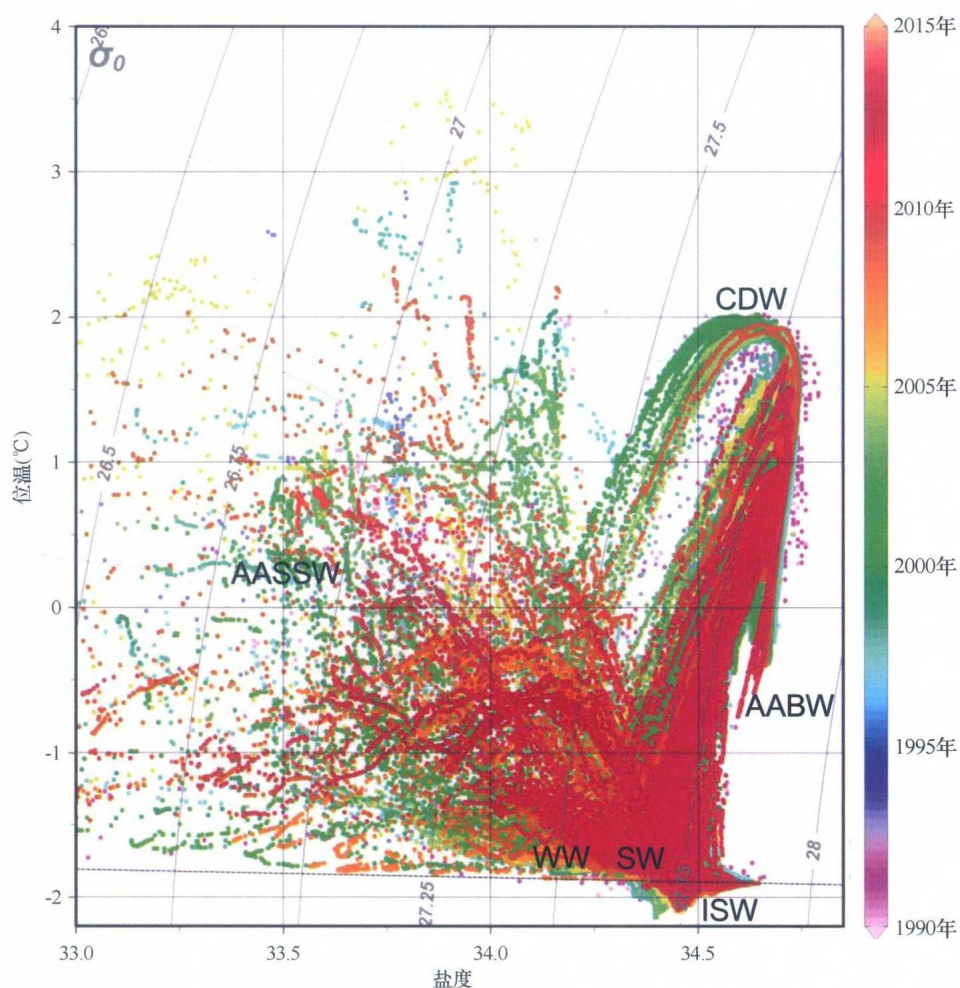


图 1-2 利用中国于 1990—2013 年间在普里兹湾及邻近海域获得的 CTD 数据绘制的位温-盐度

图中标出了主要水团名称的缩写, 其对应的中文名称见正文。灰色曲线为等势密度 (σ_t , 单位: kg/m^3) 线, 黑色点线表示海面冰点。圆点的颜色表示观测年份

1.3.1.2 陆架水与冬季水的区分

陆架水与冬季水都是夏季表层水之下的低温水团，分处陆架区和海盆区。第9次中国南极考察资料（1992年12月—1993年2月）显示，在普里兹湾以西的 63°E 断面上，100 m以浅的次表层有两个冷中心， 64°S 为冬季水，南面 $66^{\circ}30'\text{S}$ 为陆架水，两者明显是分开的；但是，在正对普里兹湾的 73°E 断面，却有低于 -1.5°C 的冷舌从普里兹湾一直延伸到 65°S （周培强和孙日彦，1995）。对中国第15次南极考察资料（1998年11月—1999年2月）的分析也发现了这一现象（蒲书箴等，2000b），在 70°E 、 73°E 和 75°E 断面的50 m上下有一个温度为 -1.6°C 左右的冷水舌（盐度为 $34.3\sim 34.4$ ），从 67°S 向北水平地楔入夏季表层水和绕极深层水之间，在 66°S 以北海域形成了一层大约50 m厚的温度均匀层（图1-3）。蒲书箴等（2000b）将其称为陆架水北扩，并认为在没有南极底层水生成和外输的陆架区，这是对南极辐散带以南南极表层水向南输运的一种非常重要的北向补偿过程。但是，应该注意到二者的盐度还是有所区别的，即冬季水比陆架水略淡，而盐度断面图

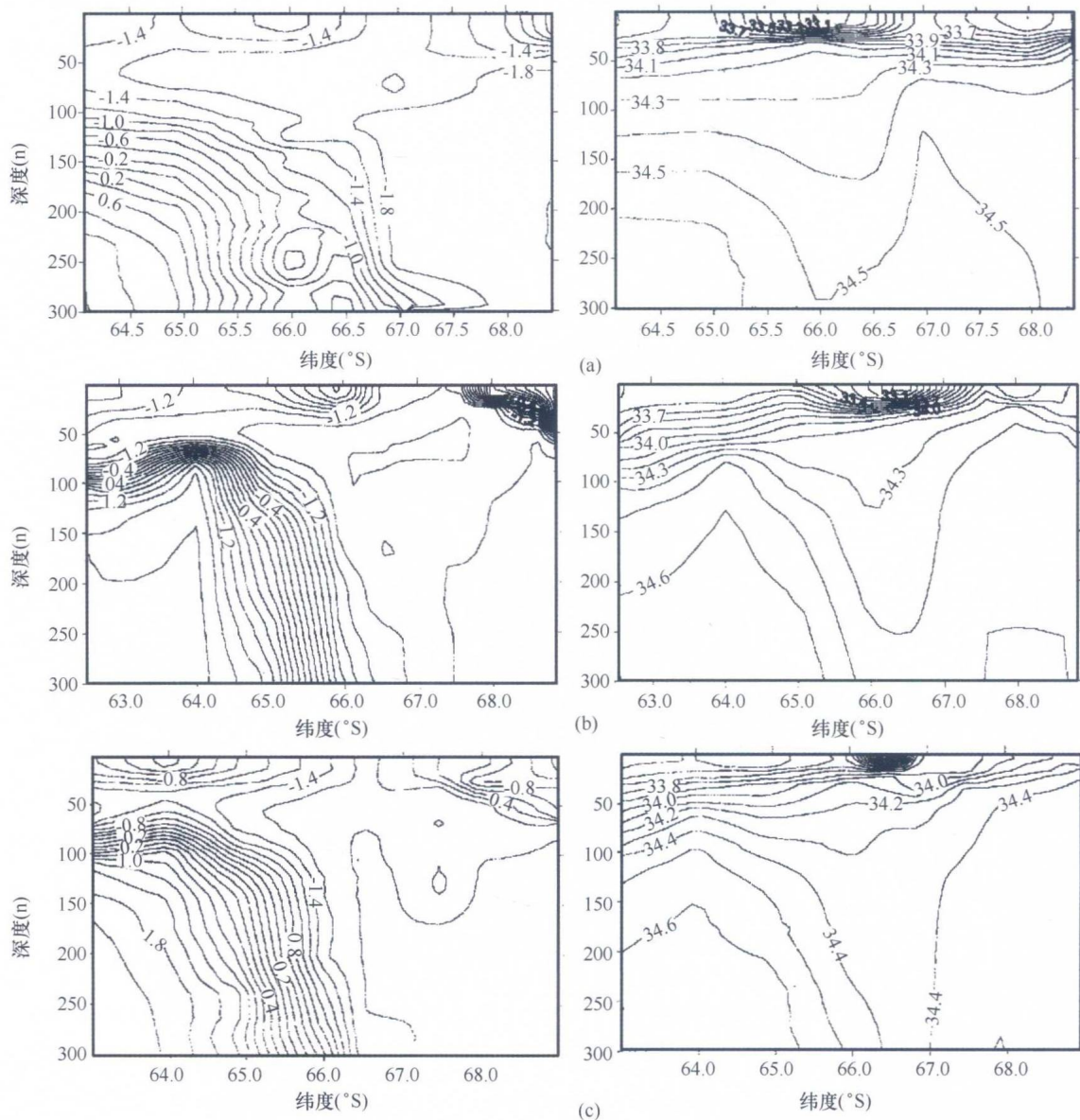


图1-3 1998/1999年夏季观测的温度（单位： $^{\circ}\text{C}$ ，左图）和盐度（右图）经向断面分布图（蒲书箴等，2000b）

(a) 70°E ; (b) 73°E ; (c) 75°E

上并没有对应的北扩高盐水舌。另外,冬季水在垂向温度剖面中表现为极小值,其下是较暖的绕极深层水,因此冬季水之上为温跃层,之下形成逆温跃层(苏玉芬和乔荣珍,1990;蒲书箴等,2000b);而陆架水一般处于陆架区的中下层,其低温和高盐性质直达海底。

1.3.1.3 埃默里冰架出流水的性质与分布

普里兹湾的最南端被东南极最大的冰架——埃默里冰架所覆盖,冰架下充满海水的洞穴可以一直连通到73°S附近。早期的研究就已发现在普里兹湾内存在低于-1.9℃的ISW,并推测其来自埃默里冰架下的海洋(董兆乾等,1984;董兆乾和梁湘三,1993)。自2003年开始,中国南极考察队设置了冰架前缘断面(陈红霞等,2005),为ISW的研究积累了丰富资料。2003—2008年间中国在该断面上获得的CTD资料及澳大利亚在2001—2002年间的CTD数据,给出了ISW在埃默里冰架前缘海域的空间分布特征(Zheng et al., 2011):相对冷且淡的ISW出现在冰架前缘海域的季节性温跃层之下,表现为若干分离的低温水块;最冷的ISW通常出现在冰架前缘断面的西侧,这里的ISW可能经历了最长时间的冷却,这里也是冰架水的主要流出区(图1-4)。2003年观测的70.5°E断面资料显示,ISW能够向北扩展到普里兹湾的陆架坡折处,因此有可能与上升的CDW混合并贡献于AABW的生成(Zheng et al., 2011)。利用2011年的温盐观测资料进行的分析和动力计算结果,也支持断面西部存在冰架水的北向流动的结论(严金辉等,2012)。

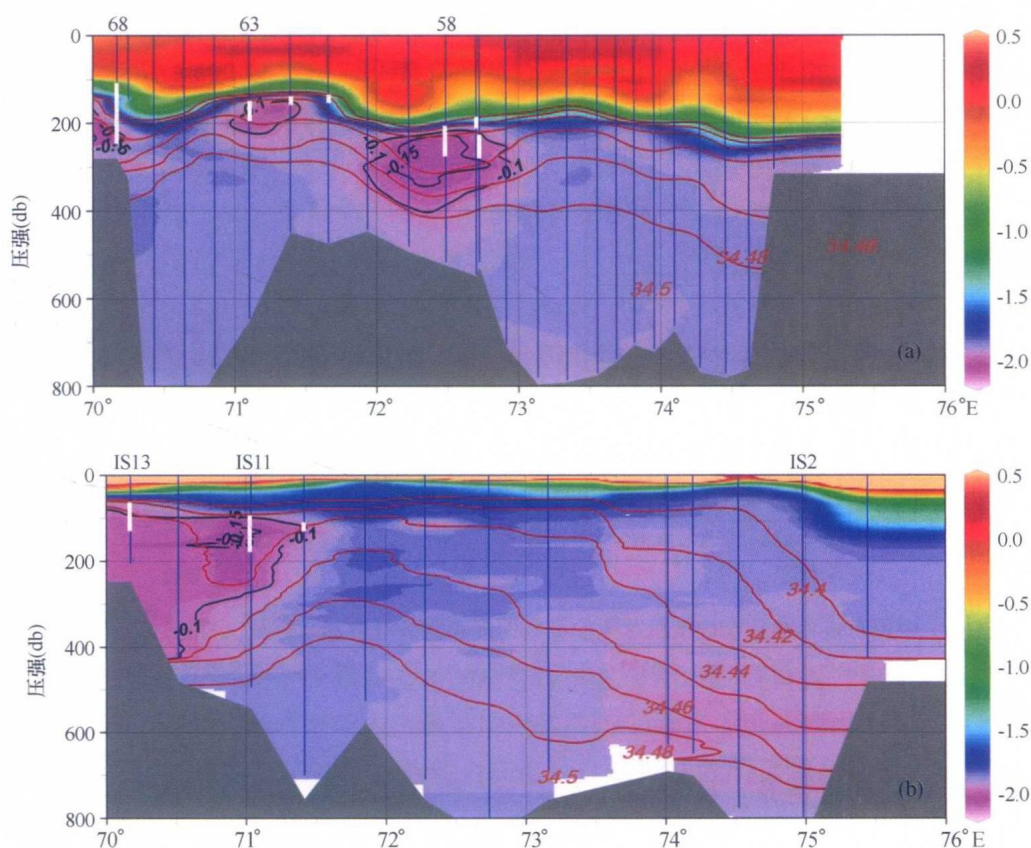


图1-4 埃默里冰架前缘断面的温度、盐度和冰架水特征温度分布(Zheng et al., 2011)

(a) 2001年澳大利亚观测结果;(b) 2006年中国观测结果

颜色表示温度,黑色等值线为冰架水特征温度,即温度与海面冰点之差。单位均为℃。蓝色直线表示观测数据,其上的白色粗线表示出现过冷却水的部分;压强(db)=10 kPa