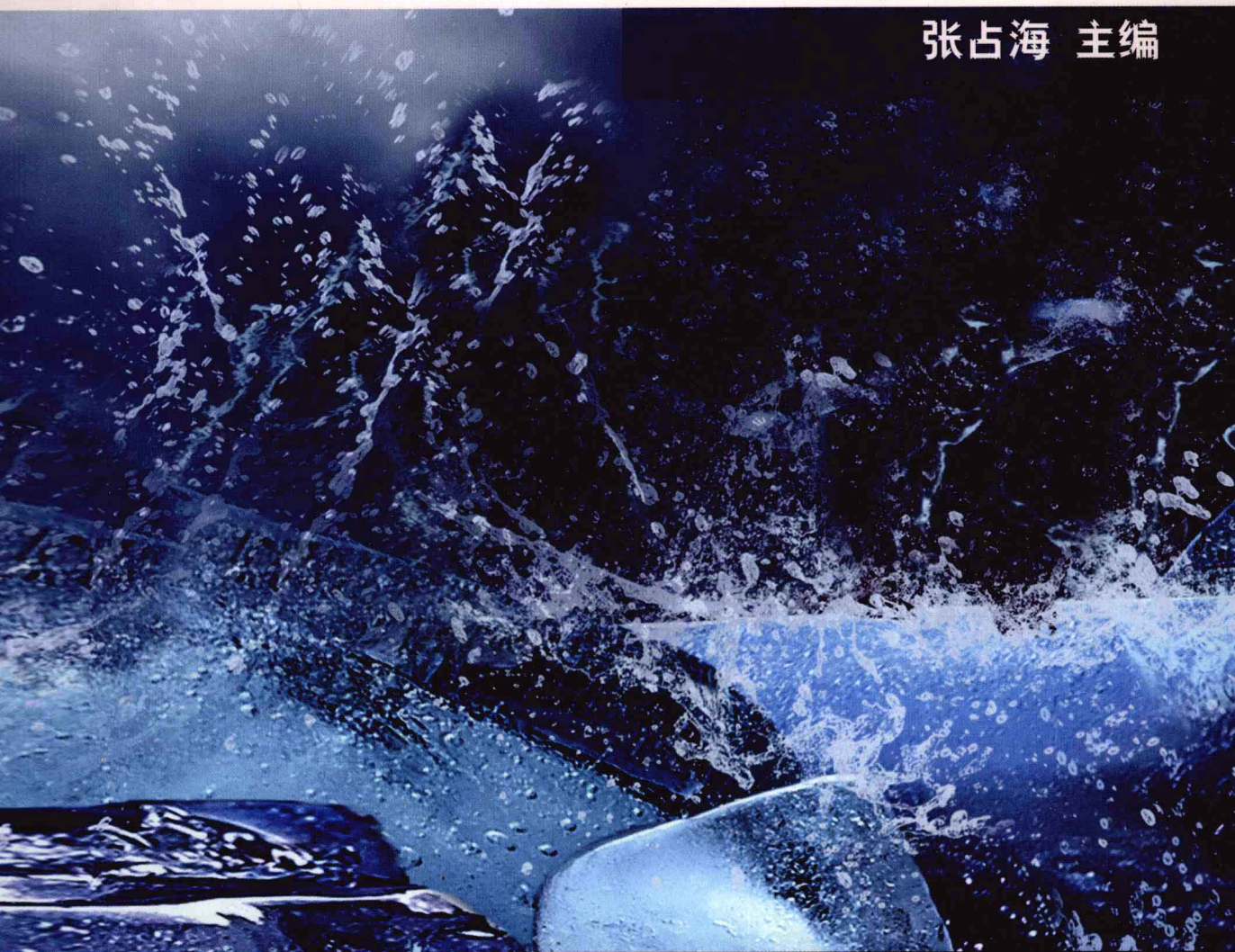


快速变化中的 北极海洋环境

张占海 主编



科学出版社

快速变化中的北极海洋环境

张占海 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

2003年7~9月,由国家海洋局主持,国家海洋局极地考察办公室组织实施了中国第二次北极科学考察。考察队由“雪龙”号科学考察破冰船承载,前往北冰洋加拿大海盆,考察了北纬80°以南的大范围海域,对北极海洋、海冰、大气进行了全面考察。本书以这次北极考察的数据为基础,全面研究北极正在发生的环境快速变化,分析北冰洋海洋环境对北极快速变化的响应和反馈,提高对北极环境变化过程的认识和理解。

本书适合地球科学领域中研究极地科学、海洋学、气象学、生物学、地质学、地球化学及全球变化的大学本科生、研究生和科研人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

快速变化中的北极海洋环境/张占海主编,一北京:科学出版社,2011
ISBN 978-7-03-031308-9

I. ①快… II. ①张… III. ①北冰洋-海洋环境-研究 IV. ①X145
中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第102845号

责任编辑:韩 鹏 朱海燕 赵 冰 贺窑青/责任校对:桂伟利
责任印制:钱玉芬/封面设计:刘可红

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京天时彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年6月第一次印刷 印张:32

印数:1—2 500

字数:744 000

定价:268.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

自从 1999 年我国第一次大规模开展北极考察以来，至今已整整 12 年。在这 12 年间，我国的北极研究水平不断提高，高水平学术成果不断增多，北极科学家队伍不断壮大。通过持续的北极研究，对北极海洋、海冰、大气耦合系统有了充分的了解，对重大科学问题有了深入的认识，在解决这些科学问题方面做了系统的努力。尤为重要的是，这 12 年，北极正在发生快速变化，是地球系统中正在发生的重大事件之一，不仅对区域性的海洋大气物理过程和海洋生态系统造成显著影响，而且对全球气候系统产生强烈的反馈。

2003 年进行的中国第二次北极考察是我国北极研究的重要里程碑。当时，经过第一次考察的磨砺及为期 4 年的研究工作，北极的科学研究队伍对北极的变化有了更深刻的认识，科学目标更加明确，面对的科学问题也更加集中。带着解决这些科学问题的强烈愿望和具体目标，综合并凝聚了我国北极科学界的认识和智慧，我国以全新的风貌第二次走向北极。

第二次北极科学考察首次采用了测区的概念，针对每个测区的科学问题设定考察站位，使每个站位的考察都针对具体、明确的科学目标；同时在考察中充分注意测区之间的衔接，考察结果与以往国内外的北极考察有很好的可比性。考察对北极海冰的变化给予了突出的关注，并对海冰的精细结构及其在大范围内的空间变化都进行了详细的考察，后来的研究证实对海冰的关注对各个学科都有重要的帮助。考察对北极的海洋物理过程、海洋生物地球化学循环、海洋生态系统、海洋沉积与古海洋学都进行了系统的研究。考察对大气化学方面进行了更广泛的取样和研究，在极地大气环境研究方面取得了长足的进展。考察结束后开展了多年的研究工作，考察取得的宝贵数据逐步成为科学成果。2007 ~ 2009 年是第四次国际极地年，我国第二次北极考察的数据支持我国年轻的北极研究队伍走向国际北极科学舞台。

我国的考察展示了北极中层水增暖的空间特征，见证了这一重要现象的变化过程。通过海洋物理学与同位素化学的结合，在北极水团分布与混合方面取得新的认识。研究工作首次揭示了发生在加拿大海盆 70 ~ 150m 的营养盐极大现象，揭示了发生在那里的特殊的生物地球化学循环。通过对沉积物中的有机质和同位素的分析，对北冰洋碳汇作用的埋藏机理有了新的认识。考察对加拿大海盆浮游动植物物种和海冰生物群落进行了全面考察，为研究北极变化中的物种迁移和生态系统演替奠定了坚实的基础。通过对北极表层沉积物中有机质、有孔虫和同位素的分析，深入研究北冰洋的古海洋学特征和物质循环。通过对位于北纬 80° 北极长达几天的观测，获得了北冰洋深处持续时间最长的大气过程观测记录，对那里的大尺度海冰气相互作用有了更深刻的了解。通过冰站的观测使我国第一次观测到海洋涡旋，这个庞大的涡旋出现在距离源地 1200km 的地方，深化了对北极涡旋输送的认识。对北极大气化学的研究揭示了在清洁的北极正在发生的污染物输送，为北极环境保护提供了有价值的科学依据。

第二次北极科学考察使我国的科学家走向成熟, 若干成果达到国际先进水平, 有些研究工作融入了国际北极前沿科学领域。本书汇集了以我国第二次北极科学考察为基础的主要研究成果, 对北极快速变化中海洋、海冰和大气的变化有了全面的认识, 对我国的北极研究具有承上启下、继往开来的科学价值。希望未来我国的北极研究能够取得更大的进展, 逐步认识正在变化的世界, 揭示北极对我国气候的影响, 研究北极在全球变化中的作用, 开启我国北极研究的新时代。

陈连增

2010年2月2日

编委会名单

主 编：张占海

副主编：赵进平 卞林根 王 勇

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

陈 波 陈建芳 陈立奇 陈 敏 高爱国

高众勇 李超伦 李志军 史久新 王汝健

谢周清 张光涛 赵 平

目 录

序

第一部分 海水物理结构和海洋环流

2003 年夏季白令海峡北向流水体结构研究	2
2003 年夏季白令海峡和楚科奇海海流特征	11
2003 年太平洋水在北冰洋加拿大海盆的分布	22
加拿大海盆冰下上层海洋湍流系数的估计	36
加拿大海盆次表层涡旋的结构和性质	48
北冰洋加拿大海盆的双盐跃层结构	58
西北冰洋水文学过程的同位素示踪	69
参考文献	80

第二部分 北极海冰热力 - 动力学特征分析

夏季北极浮冰密集度、形态和厚度的空间分布	88
夏季北极海冰底面形态和漂流特征	99
夏季北极浮冰关键雪热力学过程和参数反演	107
参考文献	115

第三部分 北极海 - 冰 - 气相互作用过程

北冰洋浮冰区近地层参数	120
2003 年北冰洋浮冰区大气边界层结构	132
北极冰/雪面上湍流通量的模拟及其粗糙度	140
北太平洋海冰异常对东亚夏季风和降水的影响	150
冬季北极涛动及其与东亚气候变化的关系	160
北极黄河站苔原区的短期气候特征	168
参考文献	181

第四部分 北极海域营养要素的 生物地球化学循环和碳循环

2003 年白令海、楚科奇海水化学要素分布特征	188
加拿大海盆营养盐极大现象及其形成机理初探	198
白令海与西北冰洋碳循环及其对北冰洋生态系统的影响	213
西北冰洋颗粒有机碳的输出通量	222
北极陆架沉积碳埋藏及其在全球碳循环中的作用	231
参考文献	243

第五部分 北极海洋生态系统与生物多样性

北冰洋与白令海浮游植物现存量 and 初级生产力	254
西北冰洋浮游动物生态特征研究	278
北极加拿大海盆浮冰生物群落结构和分布	298
北极高纬海域海冰和沉积环境微生物多样性研究	305
参考文献	333

第六部分 海洋沉积与古海洋学研究

北冰洋加拿大海盆海洋沉积物特征	342
北冰洋加拿大海盆黏土矿物的分布特征	358
楚科奇海陆架重金属沉积研究	371
北极海域环境变化的有机地球化学记录	376
白令海的古海洋学研究	390
北冰洋西部的古海洋学研究	402
参考文献	418

第七部分 北极大气环境与污染

北冰洋夏季海洋边界层气溶胶化学	430
北极碳质气溶胶及大气污染	442
北冰洋大气 Hg 及春季 Hg 雨形成机制	453
北太平洋及北冰洋多溴二苯醚类溴代阻燃剂的研究	468
北太平洋及北冰洋“六六六”类有机氯农药的研究	478
参考文献	491
作者名录	503

第一部分 海水物理结构和海洋环流

北极正在发生的快速变化主要发生在加拿大海盆，而加拿大海盆正是我国北极考察的主要海区，考察获得的数据为揭示北极的快速变化有重要作用。本部分内容主要针对海洋水团和环流结构变化开展研究，主要成果涉及通过白令海峡入流流量和水团的变化、太平洋水体在北冰洋的扩展、北极海冰减退引起的上层海洋结构变化、北极整个环流系统的演化引起的中层水增暖、北极上层海洋双跃层结构的演化、海洋涡旋的直接观测证据和涡旋输送、同位素水团示踪等。加拿大海盆的水体成分复杂，上层有来自太平洋的水体和来自陆地径流的水体，中层有来自大西洋的水体，除物理海洋学分析外，同位素示踪方法更好地揭示了太平洋水、融冰水和径流水的分布与比例。水体和环流的变化引起海洋水团结构的变化，对海洋热平衡和海洋生态系统都有重要影响，本部分内容对各个主要水团的分布进行了深入细致的研究。海冰融化后，上层海洋发生显著变化，形成盐度跃层加强、水团结构改变、湍流状态加强等现象，书中对这些变化进行了定量研究，其成果揭示了上层海洋变化过程，对其他学科也有重要的启示。北极的海洋涡旋输送在北极变化过程中占有重要地位，直接观测到的海洋涡旋体现了北极涡旋的主要特征，为研究涡旋输送奠定了宝贵基础。

2003 年夏季白令海峡北向流水体结构研究

赵进平 史久新 高郭平 矫玉田 张洪欣

白令海峡水深不超过 60m, 是北冰洋与太平洋连通的唯一通道, 连接了南部的白令海 (Bering Sea) 和北部的楚科奇海 (Chukchi Sea) 两个陆架海域。白令海峡的背景流场是穿越海峡的北向流, 由白令海峡两端的水位差所驱动, 海面坡度大约 10^{-6} (Coachman et al., 1975; Stigebrandt, 1984; Coachman and Aagaard, 1966)。这个海面高度差一般归因于太平洋与大西洋的密度差别, 太平洋水冷而淡, 大西洋水暖而咸, 按照无运动面的假设可以计算出两大洋的海面高度差为 0.65m (Reid, 1961; Warren, 1983)。太平洋的海水通过白令海峡流入北冰洋, 在北冰洋风场和地形的共同作用下向北冰洋的中心区域扩展, 对北冰洋的海冰过程和物质扩散产生非常重要的影响。

白令海峡的流量变化很复杂, Coachman 和 Aagaard (1981) 及 Aagaard 等 (1985) 估计其年平均流量为 0.6 ~ 0.8 Sv。白令海峡的流量有明显的季节变化 (Fedorova and Yankina, 1964)。秋冬季节强劲的北风会在一定程度上抵消海面坡度的作用, 使北向流量减小, 1975 年 9 月至 1976 年 3 月的北向输送大约为 0.3 Sv (Coachman and Aagaard, 1981)。夏季北风减弱, 北向流量增强, 夏季的北向输送 0.8 ~ 1.5 Sv。平时的流量对风场有很好的响应, 大风作用下的输送为 3.1 ~ 5.0 Sv。

白令海陆架上的圣劳伦斯岛 (Saint Lawrence Island) 将白令海峡南端分割为另外两个海峡, 西边的为阿纳德尔海峡 (Anadyr Strait)、东边的为斯盘堡 (Shpanberg) 海峡。两个海峡都发生北向流, 过去的研究很关注两个海峡流量所占的比例。实际观测结果显示, 通过阿纳德尔海峡的流量明显较强, 可能是西向强化现象的结果 (Schumacher et al., 1983)。Overland 和 Roach (1987) 通过数值模式研究了流速的分布。结果表明, 在没有风的情况下, 阿纳德尔海峡的流量占 72%、斯盘堡海峡占 28%; 在强劲东北风作用下, 几乎全部流量来自阿纳德尔海峡, 斯盘堡海峡没有北向输运。

以往对北白令海和楚科奇海的观测很多, 特别在夏季, 对这些区域的水团特性了解也比较透彻。来自太平洋并向北进入白令海峡的主要有三个水团, 它们的起源和物理性质有明显的区别 (Coachman et al., 1975; Coachman, 1993; Stabenog et al., 1999)。白令海大陆架最靠近阿拉斯加海岸的是阿拉斯加沿岸水 (Alaska Coastal Water, ACW), 起源于北太平洋阿拉斯加湾的阿拉斯加流, 该水体在太平洋长驱千余千米, 由阿留申群岛最东侧的尤尼马克水道进入白令海陆架。这部分水体的主要部分沿 50m 等深线以内的陆架区向北流动, 在流动过程中, 与沿岸河流入海的淡水混合, 尤其是育空河 (Yukon River) 对其影响最为显著, 水团不断变性。ACW 在白令海北部进入斯盘堡海峡, 构成斯盘堡海峡的主要水体, 并进入白令海峡, 沿海峡东部 30m 等深线以东的水域进入楚科奇海, 特征盐度小于 32.0。

靠近俄罗斯沿岸的水团是阿纳德尔水 (Anadyr Water, AW)。白令海陆架的进出水量不平衡, 白令海峡输出到北冰洋的流量是 0.8 Sv 左右, 而进入陆架的尤尼马克水道的流量只有 0.5 Sv 左右, 必须有来自白令海深海盆的水体进入白令海陆架来实现水体平衡, 即存在陆架和陆坡的水体交换。北向的白令海陆坡流 (Bering Slope Current, BSC) 在纳瓦林角南部分叉, 其中一部分像一条低温、高盐、富含营养盐的河流, 从深海区穿越等深线向北进入阿纳德尔湾 (有时被称为阿纳德尔流), 最终抵达白令海峡 (Shuert and Walsh, 1993), 沿白令海峡西侧进入北冰洋, 最终进入楚科奇海中央区域。AW 的特征盐度为 $32.8 \sim 33.0$, 在三个水团中盐度最高。

白令海陆架上还有一支流动的水体, 称为白令海陆架水 (Bering Shelf Water, BSW)。是陆架上本地的水团, 存在于圣劳伦斯岛以南的中心陆架区。BSW 一部分来自从尤尼马克水道进入白令海陆架并沿 $50 \sim 100\text{ m}$ 等深线流动的阿拉斯加流水体, 还有一部分来自较早进入陆架的阿留申北坡流 (Alueutian North Slope Current) 和 BSC 的水体, 特征盐度为 $32.0 \sim 32.8$ 。BSW 沿圣劳伦斯岛东西两侧向北输送, 夹在 ACW 和 AW 之间进入白令海峡。

这三个水团都抵达白令海峡, 并行向北流动。其中, ACW 沿海峡东岸流动, AW 主要沿海峡西岸流动, BSW 在两者之间进入海峡 (Piatt and Springer, 2003)。夏季表层的增暖导致垂向层化和水柱的稳定性, 淡水径流降低表层水的盐度增加水柱的稳定性, 夏季的风暴也对各水团的上层水进行混合, 在 $10 \sim 20\text{ m}$ 深度上出现密度跃层 (Coachman et al., 1975)。因此, ACW 比 BSW 的稳定性大 1 个量级。但是, 在这样小的范围内存在 3 种不同的水团, 而且水团之间的密度差异明显, 在水团之间形成强的锋面, 水团之间的混合不可避免。水团之间的锋面可以充分混合或出现无层化的水体, 边界处出现上升或下降流 (Piatt and Springer, 2003)。在白令海峡南端, 由于混合发生, 有时 AW 和 BSW 难以清楚地区分。

观测表明, 在白令海峡中部存在一个不大的契里科夫盆地, 进入白令海峡的流动在契里科夫盆地减弱, 海流的动能转化为水体的湍流运动, 导致海峡水体的充分混合和显著层化。

因此, 从白令海峡进入北冰洋的水体来源很复杂, 既包括经白令海陆架辗转而来的太平洋水体, 又包括来自白令海深海盆的上层水体。研究经白令海峡进入北冰洋的水体结构是了解太平洋对北冰洋影响的重要科学内容。由于以往的观测数量有限, 对白令海峡水体结构的认识还不是很充分。2003 年, 我国第二次北极科学考察队对白令海峡及其邻近海域进行了现场考察, 获得的数据有利于对穿越白令海峡进入北冰洋的水体结构有清晰的认识。与本书有关的考察站位有位于白令海峡南端 $64^{\circ}20'N$ 的 BS 断面, $171^{\circ}30'W \sim 167^{\circ}00'W$ 共有 BS01 ~ BS10 等 10 个站位, 站位间距为半个经度; 在白令海峡中部有 BS11 站 ($168^{\circ}52'26''W$, $65^{\circ}30'31''N$); 在楚科奇海的众多站位中, 位于白令海峡北端的 R01 站 ($169^{\circ}00'49''W$, $66^{\circ}59'28''N$) 能最好地体现白令海与白令海峡水体的关系。此外, 在白令海的 BR 断面体现了白令海深海盆和陆坡区的水体结构, 其中 BR08 ~ BR12 站位位于白令海大陆坡, 可用来研究白令海峡水体与深海盆水体的联系。BS 断面的 10 个站以及 R01 站在返航时进行了重复观测。所有的站位如图 1-1-1 所示。在各个站都进行了温度和盐度的观测, 形成描述进入白令海峡水体结构的宝贵数据集。

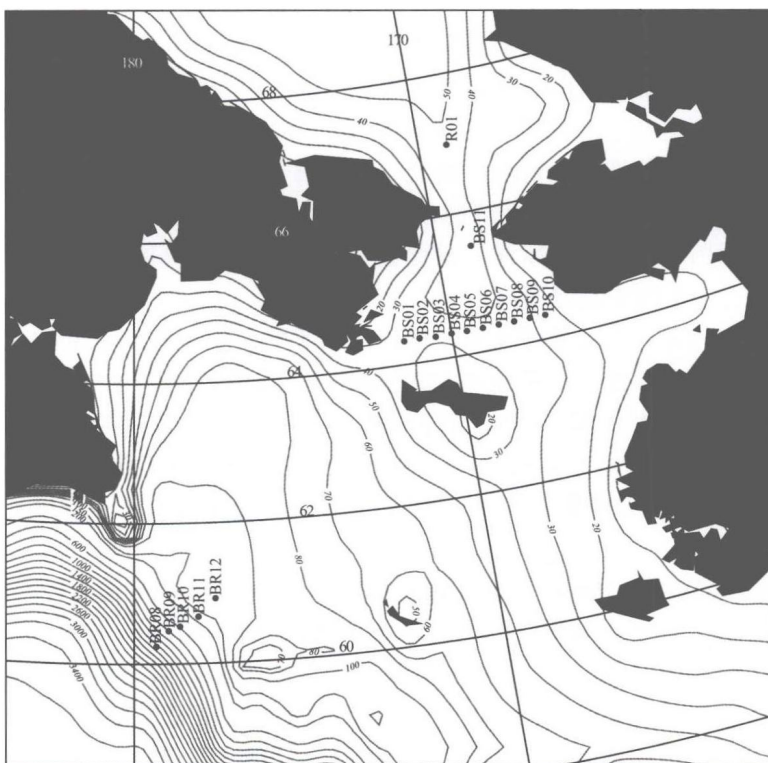


图 1-1-1 白令海北部和白令海峡考察站位图

1 白令海峡中部和北部的水体结构

图 1-1-2 是白令海峡中部 BS11 站的温度和盐度剖面图。从图中可以看出，海峡中部的水体结构非常简单，基本上是两层结构，15m 以上为上层、25m 以下为下层、15 ~ 25m 为跃层，温度和盐度跃层有非常好的一致性。两层的水体结构都非常均匀，分别受到风混合和潮混合的作用，上、下层水体的平均温度分别为 7.2℃ 和 3.0℃，平均盐度分别为 31.8 和 32.4，按照白令海峡水团的定义应该属于 BSW。仅凭这一个站的数据不能断言上、下层水体是否起源于不同的水团，但上层水显然受融冰或陆源淡水的影响盐度降低，同时受到太阳辐射加热温度增高，形成变性水团。

这种两层结构在其下游的 R01 站也体现出来（图 1-1-3）。R01 位于白令海峡北端，在 2003 年 7 月 30 日和 9 月 10 日分别进行了观测。从图 1-1-3 中可以看出，R01 站也是上下两层结构，与白令海峡中部的温盐结构相似，上层高温低盐、下层低温高盐。R01 站上层的盐度与海峡中部基本一样，混合的深度浅一些。但是，到 9 月 10 日，上层的盐度比第一次观测时降低了 1，形成盐度降低的原因应该是来自东西伯利亚海的陆架冲淡水进入 R01 站附近。9 月 R01 站下层水体的温度降低了将近 1℃，而上层水温度增加了 2℃。7 月底上、下层温差只有 2.5℃，而 9 月达到了 5℃。

BS11 和 R01 两站设在水深最大的地方，两者的温度和盐度差别不大，体现了两站的

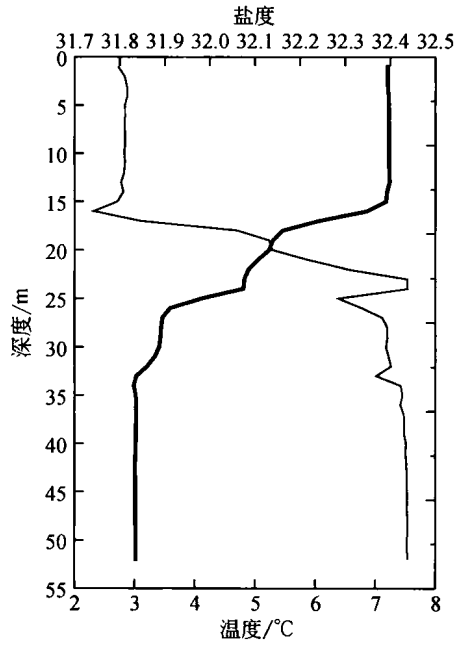


图 1-1-2 白令海峡中部入流水温盐结构

2003 年 7 月 29 日, 168°52'26"W, 65°30'31"N, 粗实线为温度, 细实线为盐度

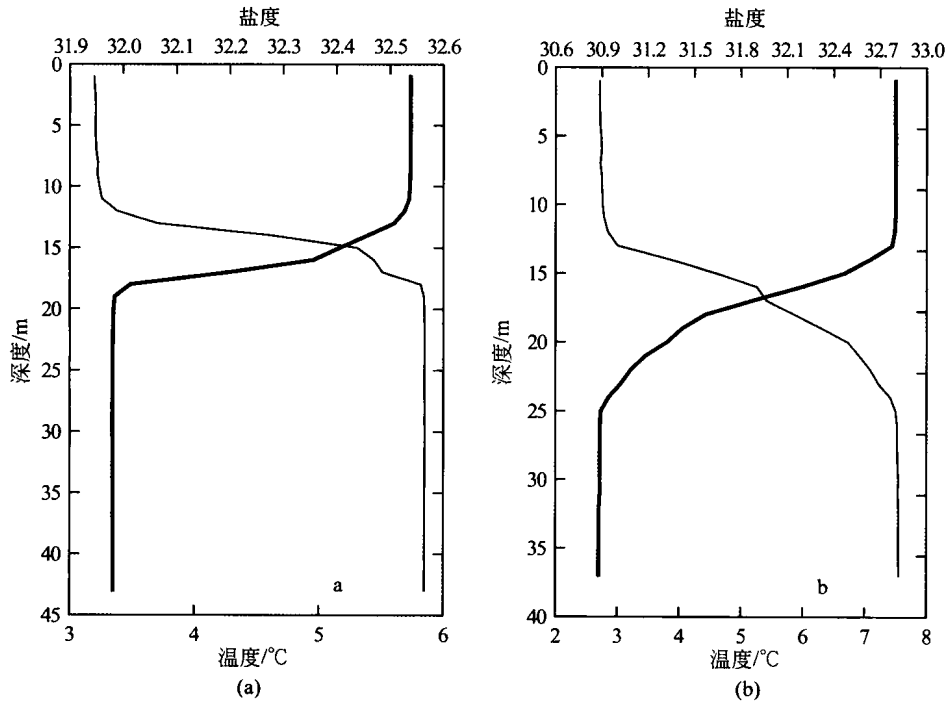


图 1-1-3 R01 站 (169°00'49"W, 66°59'28"N) 温度和盐度的重复观测结果

(a) 为 2003 年 7 月 30 日, (b) 为 9 月 10 日

上、下游关系。在相隔 40 多天时间里对 R01 站的重复观测都呈现两层结构, 表明两层结构在白令海峡是典型的和有代表性的。在楚科奇海的观测结果也表明, 这种上、下层结构也是楚科奇海水体的主要结构。

从这两站的观测数据只能了解白令海峡中线附近的水团特征, 对进入白令海峡水体结构的全面了解还要靠研究横贯海峡断面的数据。

2 白令海峡南端剖面的水体结构

由于在海峡中部没有横穿海峡的断面, 无法了解海峡中水体的东西向差别, 不能肯定海峡的两层结构在横海峡方向上是不是带有普遍性。白令海峡南端的 BS 断面有助于理解进入白令海峡的水体结构。图 1-1-4 是 BS 断面的温度和盐度在两次观测时的断面图, 图中的白色线分别为 32.0 和 32.8, 代表三个水团的分界值。

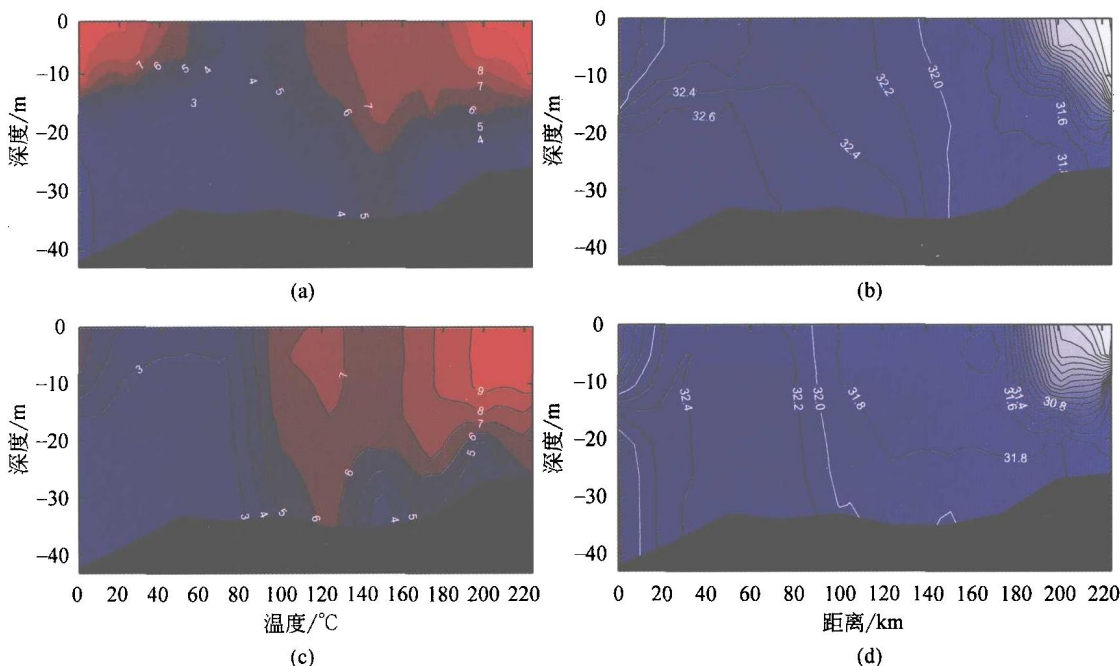


图 1-1-4 两次观测海峡南端断面的温度(左)和盐度(右)分布

(a) 为 7 月 28/29 日断面, (b) 为 9 月 12/13 日断面

(c) 为 2003 年 7 月 30 日, (d) 为 9 月 10 日

BS 断面东部上层受育空河冲淡水的显著影响, 具有高温低盐的特征, 其盐度在整个断面最低, 达到 27.85; 温度最高, 达到 9.8℃。忽略上层低盐水体, 东部站位的下层水体比冲淡水温度要低, 盐度要高, 是冲淡水与陆架水的混合水体, 是典型的来自斯盘堡海峡的 ACW。以盐度 32.0 为界, ACW 控制的范围在第一航次约占海峡的 1/3, 第二航次约占 55% 以上。

BS 断面西部的上层水体也受到沿岸冲淡水和加热过程的影响, 体现了高温低盐的特征, 温度高达 9.3℃, 盐度在 32.2 以下。具有这种特征的水体影响范围不大, 7 月影响 3

个站, 而 9 月只影响 1 个站。BS 断面西部的下层是低温高盐水体, 代表性的温度是 3.0°C , 代表性盐度是 32.4, 是整个断面里温度最低的水体, 按照盐度的划分属于 BSW。在 7 月 28/29 日航次中, 断面西部的 2/3 水体都是 BSW, 低温高盐的下层水占据断面的 1/2, 没有 AW 存在的迹象。而在 9 月 10 日的航次中, BS 断面西部也出现了盐度高于 32.8 的水体, 表明 AW 出现向东扩展, 加之东部的 ACW 向西扩展, BSW 受到两个方向的夹击, 占据的空间由断面的 2/3 下降到 1/3 左右。从温度结构来看, 如果说第一航次断面的水体以上下结构为主, 第二航次则呈现了明显的东西结构特征。

从 BS 断面水体的分布可以看出, 海峡中部 BS11 站的温度与盐度结构与 BS 断面西部很相似, 其下层 3.0°C 的特征温度和 32.4 的特征盐度与西部 4 个站都很接近, 而其上层的温度与盐度更接近于 BS01 站, 表明白令海峡中部的水体主要是来自 BS 断面最西侧的水体。9 月航次的结果与 R01 站重复测量的数据相比较, 其上、下层水体的盐度分别为 30.9 和 32.8。在 BS 断面与 R01 站下层的高盐相对应的只有 BS01 站, 该站在 9 月符合 AW 的水团特征。根据以往的观测, AW 的范围扩展是经常的事, 在白令海峡中契尔科夫海盆的观测表明, 7 月 AW 的驻留时间为 10 ~ 20 天, 8 ~ 9 月的驻留时间为 20 ~ 50 天 (Coachman and Shigaev, 1992), 因此, 在 R01 站观测到的水体有时是 AW, 有时是 BSW。

3 白令海陆坡流的水体结构

前人的研究认为进入白令海峡的水体有一部分来自白令海的陆坡流。为了探讨 BS 断面水体的来源, 我们了解一下白令海陆坡水体的结构。图 1-1-5 是 BR 断面的一部分, 包含 BR08 至 BR12 共 5 个站。从图中可见, 该海域的水体结构很简单, 上层是高温低盐的

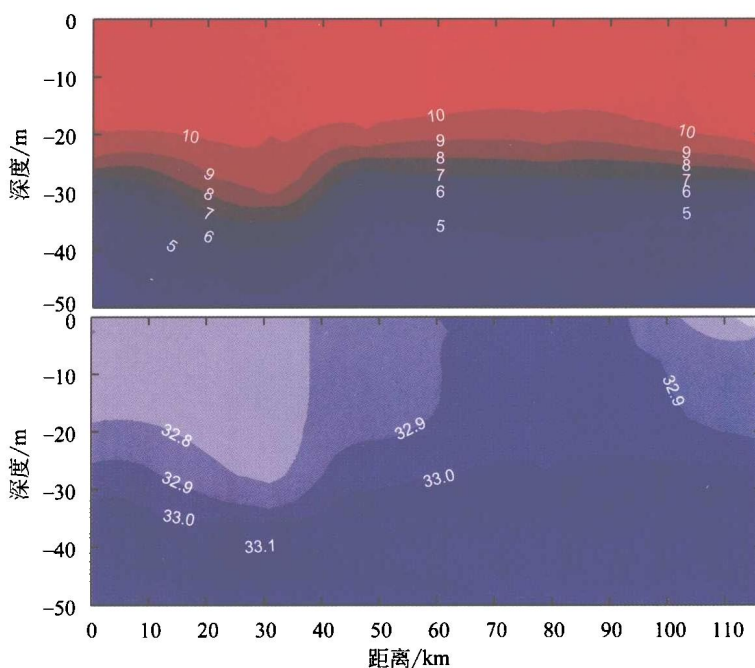


图 1-1-5 白令海陆坡区上层海水温度 (上图) 和盐度 (下图) 分布
 距离从 BR08 站 ($179^{\circ}23'49''\text{W}$, $60^{\circ}14'50''\text{N}$) 到 BR12 站 ($177^{\circ}45'00''\text{W}$, $60^{\circ}55'13''\text{N}$)

白令海上层水, 下层是低温高盐的次表层水。表层水和次表层水实际上属于同一个水团, 即白令海中间水团 (intermediate Bering Sea water mass, IBWM); 由于表面融冰和太阳辐射加热, 在表层形成了一个变性的高温低盐层。

大陆坡的水体与 BS 断面的水体有很大差异, BS 断面 20m 以下水体的温度只有 3℃, 而大陆坡 20m 以下水体的温度为 5 ~ 10℃, 到 50m 水深才有 3℃ 的水体。RS 断面的盐度在 7 月航次全部低于 32.8, 在 9 月航次, 只有 BS01 站的盐度超过 32.8, 达到 33。而大陆坡水体的盐度均在 32.8 以上, 50m 水深的盐度达到 33 以上。温度和盐度的数据表明, 7 月航次 BS 断面并没有出现来自大陆坡的 AW 水体, 即使有也只能在 BS01 站以西; 在 9 月航次, BS01 站的水体结构与 BS 断面的水体非常接近, 只能是 AW 水体。白令海大陆坡距离白令海峡 300 多海里, 需要跨越等深线爬升进入阿纳德尔湾, 辗转到达白令海峡, 使得 BS01 站出现温度 3℃、盐度 33 的深海区水体。

4 白令海峡附近的主要水团分析

图 1-1-6 给出了白令海峡附近的主要水团。从图中可以看出, 在白令海峡及其邻近海域有 4 个主要水团。

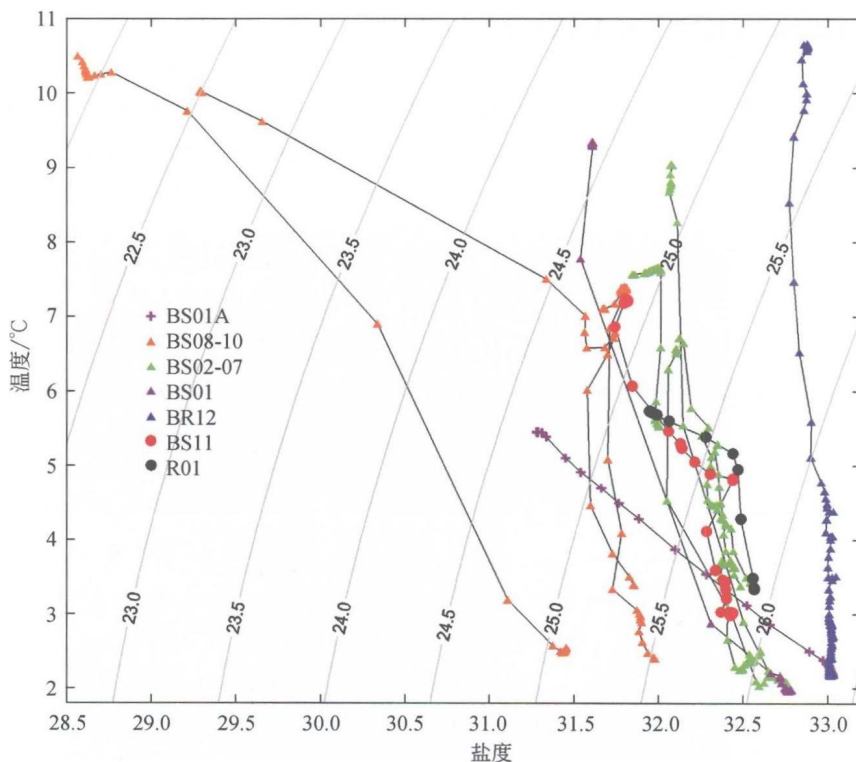


图 1-1-6 白令海峡附近的主要水团

最为特殊的一个是大陆坡附近的 IBWM, 具有典型的高盐特征, 不论是上层还是下层的盐度都比陆架水体的盐度高。虽然白令海水的温度从表面向下递减, 盐度也有层化现象, 但都属于 IBWM。IBWM 的盐度变化范围很小, 在图 1-1-6 中体现了与其他水团的根

本差别。

另一个比较特殊的水团是 ACW，其上层主要是育空河的冲淡水，主要发生在海峡南端东侧 BS08 至 BS10 三个站，由于与高温陆源淡水的混合，特点是温度高、盐度低，在图 1-1-6 上，这三个站的水体盐度明显低于其他站位。

BS 断面的 BS02 至 BS07 站具有基本相同的温度和盐度特征，上层高温低盐、下层低温高盐，体现为进入白令海峡的核心水体，即 BSW (Coachman, 1993)。与白令海峡的 BS11 站及海峡北部 R01 站的温度和盐度比较，BS02 至 BS07 站与其属于同一水团。在这些站位上，上、下层水体有非常明显的差别，在图 1-1-6 中也体现了明显的跃层。但是，在图 1-1-6 中，这些站的温盐分布体现了线性特征，表明上、下层的水体属于同一水团，其差别是与近岸淡水的混合比例不同所致。不过，由于上层水体变性很明显，在流向北冰洋的过程中长时间保持其自身的特点，也可以将上、下层水体细分为不同的水团。

在 7 月航次，BS 断面最西侧的 BS01 站上层有明显的低盐特征，体现了与沿岸淡水的混合变性，而下层与 BS02 至 BS07 站位的特征一致，因此仍然属于 BSW。但是到了 9 月，BS01A 站出现了盐度高于 33 的水体，该站深水层的温度和盐度在图 1-1-6 上与位于白令海大陆坡的 BR 断面水体衔接在一起，表明来自白令海深海盆的水体到达了白令海峡南端，即 AW。结果表明，AW 与 IBWM 上层的温度和盐度有很大的差别，但在深水层温度和盐度非常一致。

5 结果与讨论

利用中国第二次北极科学考察队对白令海峡及其邻近海域的现场考察数据研究了穿越白令海峡进入北冰洋的水体结构。

白令海峡及其南部的水体共有以下 4 个水团：位于白令海大陆坡的 IBWM，从斯盘堡海峡进入白令海峡的 ACW，从阿纳德尔海峡进入白令海峡的 AW，以及夹在 AW 和 ACW 之间的 BSW。其中，AW 起源于 IBWM，在 40m 以下的水层二者结构基本一致，但是由于 AW 在阿纳德尔湾近一个月的流动中与陆源淡水混合，上层水体发生强烈变性，已经与 IBWM 有很大的差别。AW、BSW 和 ACW 共三个水团并行进入白令海峡，在 BS 断面形成复杂的结构。本文的结果表明，2003 年 7 月 BS 断面只有 BSW 和 ACW 两个水团的水体，海峡中部和西部的水体都属于 BSW，ACW 只存在于 BS 断面东部的三个站位，沿海峡东岸流入北冰洋。到了 9 月，在 BS01 站出现了属于 AW 的水体，表明来自白令海深海盆和大陆坡的海水辗转进入白令海峡。7 月，BSW 在 BS 断面占据 2/3 的宽度，而在 9 月的断面图中，受到 AW 和 ACW 的夹击，BSW 的宽度只有 7 月的 1/2。

这些水团的上层水体受到融冰、陆地径流、辐射加热和风混合等各种因素的作用发生显著变性。在 BS 剖面的东侧的 ACW 主要受育空河冲淡水的影响形成盐度极低的水层，剖面西侧的 AW 则受到阿纳德尔湾陆源水体的影响形成低盐水层，使得 AW 和 ACW 的海水稳定度比 BSW 高一个量级 (Piatt and Springer, 2003)，这个特点在 BS 断面的两次观测中都得到明显体现。河流冲淡水温度高于海水，有利于形成上层水体的高温低盐特征。进入白令海峡的水体在夏季的两次观测中都体现为上、下两个均匀层的结构，表明夏季的上、下层结构是白令海峡代表性的特征。这种上、下层的结构延续到楚科奇海，成为进入北冰洋水体的典型