



北极海冰快速变化及气候与生态效应

BEIJI HAIBING KUAISU BIANHUA JI QIHOU YU
SHENGTAI XIAOYING

张海生 主编



海洋出版社



北极海冰快速变化及气候与生态效应

张海生 主编



海洋出版社

2015年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

北极海冰快速变化及气候与生态效应/张海生主编. —北京: 海洋出版社, 2015. 4
ISBN 978-7-5027-9133-9

I. ①北… II. ①张… III. ①北极-海冰-科学考察-研究 IV. ①P941.62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 074137 号

责任编辑: 杨传霞 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

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店经销

2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

开本: 880 mm × 1230 mm 1/16 印张: 29.25

字数: 805 千字 定价: 198.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 专著中心: 62113110

海洋版图书印、装错误可随时退换

序 言

维护能源和海上运输通道安全已成为中国经济发展和国家安全的战略问题。随着全球气候变暖,北冰洋融冰速度加快,北极地区的能源价值和航道价值日益凸显,引起了许多国家在北极的争夺和博弈。北极地区的快速气候变化,将显著地影响东亚地区,特别是我国的环境和气候。近年来,北极快速变化所引起的一系列大气、冰雪、海洋、陆地和生物等多圈层相互作用过程的改变,不仅导致中高纬度国家极端气候事件的增加、生态系统动力学过程和渔业资源时空格局改变,还对北极地区碳的源、汇效应也产生了深刻影响。

围绕北极快速变化,世界各国不断加大了对北极的科学考察与研究。国际科学理事会和世界气象组织发起的2007—2008年第四次国际极地年期间,很多国家相继开展了一系列针对北极快速变化的考察活动。尽管我国为非环北极国家,但北极变化对我国经济与社会的发展影响深远。自1999年始,我国组织开展了对北极的大规模考察与研究,中国第三次北极科学考察不仅是我国结合国际极地年活动,作为中国行动计划的一项重要内容,也是我国围绕全球气候变化深入开展北极研究的一项重大举措。本次考察以“北极快速变化及其生态和气候效应”为主题,开展了物理海洋、海洋化学、海洋生物、海冰和大气相互作用、海洋地质等多学科综合考察。考察范围之广、内容之全、应用的技术手段之先进、取得的资料和样品之多,均超过我国前两次北极考察。本次考察也是国际上首次在西北冰洋中心区域开展的大规模、多学科综合考察活动,对持续、深入开展北极研究具有重要的意义。

通过本次考察和随后的深入研究,我国科学家对北极快速变化获得了一系列新的认识。指出,在未来一定时期内,随着全球变暖,海冰的进一步融化,生物泵作用加剧,在短期内北冰洋作为大气 CO_2 汇的能力将进一步增强;然而,其作为大气 CO_2 强汇的潜在能力将最终消失。进一步证实了北极海冰减少是导致欧亚大陆中高纬度地表温度负异常的关键过程。发现太平洋入流水的变动对海冰变异及对北冰洋浮游生态系统产生深远影响。获得了不同的浮游动物群落类型数量与种群变化、地理分布等相关信息。揭示出西北冰洋的物质及污染物分配,水平输送过程起着重要作用。提出了楚科奇海盆和阿尔法脊晚第四纪以来存在多个冰筏碎屑(IRD)事件。研究成果发表在《Science》和《Deep Sea Research》等杂志上,大大丰富了此前国际上的有关认识。

本专著汇集的研究成果,使我们对“北极海冰快速变化及气候和生态效应”这一国际上关注的命题有了新的认识,是我国对第四次国际极地年的一大贡献,不仅提高了我国极地科学研究的水平,同时也扩大了我国北极研究的国

际影响，拓展了我国的国际合作领域。期待我国极地科技工作者以此为基础，在北极快速变化对全球气候尤其是中低纬度气候的影响、北极碳循环与生态系统演变、北极航道适航性评估等关系人类福祉的重大前沿问题的研究取得更优异的成绩。

陈建清

2014年8月30日

前 言

中国第三次北极考察是经国家海洋局批准的国际极地年 (IPY) 中国行动计划的一项重要内容。考察和研究围绕国家需求和科学前沿, 以“北极快速变化及其生态、环境和气候效应”为主题, 开展了物理海洋、海洋化学、海洋生物、海冰和大气相互作用等多学科综合研究。主要研究内容包括: ①北极海、冰、气界面与北极系统的耦合变化研究; ②北极环极边界流及北极动力环境变化过程研究; ③北冰洋碳和生态要素的生物地球化学循环研究; ④北极生态系统结构和变异; ⑤北冰洋晚第四纪古海洋演化历史研究; ⑥北冰洋深海微生物及其基因资源的多样性研究; ⑦北极气候变异及其对我国气候的影响机理; ⑧极地大气、冰雪及海洋边界层痕量气体及持久性有机污染物 (POPs)。

中国第三次北极科考于 2008 年 7 月 11 日开始实施, 2008 年 9 月 24 日结束, 历时 76 天, 总行程 12 000 海里。来自国家海洋局、教育部、中国科学院、国家气象局、新华社、中央电视台等系统的 110 名考察队员和来自法国、芬兰、美国、日本、韩国的 12 名外国科学家参加了考察。共完成 132 个站位的海洋学调查、8 个短期冰站和 1 个长期冰站的海-冰-气综合观测。考察范围之广、内容之全、应用的技术手段之先进、取得的资料和样品之多, 得到的北极科学新认知和科研成果均超过我国前两次北极考察。考察中应用了一系列新的观测技术, 对海洋和海冰的精细结构进行观测。其中有首次在北极空投 XCTD、人造光源海冰光学实验、走航自动观测设备、海洋剖面探测潜标、自主研发的遥控海洋环境监测系统 (ARV)、150 m 声层析剖面浮标 (AITP) 和海洋剖面系统浮标 (POPs) 等观测系统。雪龙船到达的最北位置为 $85^{\circ}25'N$, 不仅开创了中国航海史北冰洋最北的新纪录, 而且拓展了考察范围。

本专著以中国第三次北极科考获得的第一手资料为基础, 将现场观测数据与历史资料相结合, 大面积调查与典型尺度过程研究相结合, 多参数、多界面、多学科的资料分析相结合, 开展了集成研究并对考察成果进行了系统总结, 获得了一系列新的科学认知。提出, 在未来一定时期内, 随着全球变暖, 海冰的进一步融化, 生物泵作用加剧, 在短期内北冰洋作为大气 CO_2 汇的能力将进一步增强。然而, 其作为大气 CO_2 强汇的潜在能力将最终消失。经过近十年的研究, 使我们对北冰洋次表层暖水的研究, 从诊断分析阶段进入物理过程研究阶段。利用夏季北极考察数据和卫星遥感数据, 建立了夏季冷水团与冬季冰间湖之间的明确关系, 对白令海冷水团的多年变化形成了完整认识。发现了北极海冰减少是导致欧亚大陆中高纬度地表温度负异常的关键过程, 近 20 年来北极夏季海冰呈显著减少, 冬季西伯利亚高压呈现增强的趋势, 并伴随着亚

洲大陆中高纬度地表温度的降温趋势,是导致近年来东亚严冬频发的主要原因。揭示出太平洋入流水的路径,确定了西北冰洋淡水组分的平均停留时间,为评估全球大洋热盐环流强弱的时间尺度提供了新思路。通过开展西北冰洋岩芯沉积物中多种替代性指标的系统研究,提出了楚科奇海盆和阿尔法脊晚第四纪以来存在多个冰筏碎屑(IRD)事件,不仅指示了粗颗粒沉积物的来源和冰山的输出作用,而且反映了加拿大北极冰盖的崩塌和气候变化与波弗特环流的变化历史,补充和验证了此前国际上有关的认识。阐明了西北冰洋生物泵作用的空间变化及其维持机制、物质及污染物分配、水平输送过程所起的重要作用。明确指出太平洋入流水的变动会对北冰洋异养浮游细菌乃至整个浮游生态系统有重要影响。界定了三种不同的浮游动物群落类型,根据底栖动物拖网样品,得到了它们的数量变化、地理分布、体型地理变化等相关信息。

北极问题正在成为全球变化研究的热点,越来越受到世界各国特别是北极地区相关国家的高度重视。北极是地球系统的重要组成部分,它包含了大气、海洋、陆地、冰雪和生物等多圈层相互作用的全部过程。本专著将北极海冰变化及其所引起的一系列物理-化学-生物-地质过程作为相互耦合的整体过程来研究,探讨北极海冰快速变化的机制及其气候与环境效应,取得了显著的进展。

全书内容由张海生、陈建芳和卞林根编审。第1章由曹勇和赵进平统稿,参加编写的人员有:赵进平、曹勇、陈红霞、钟文理、郭桂军、史久新、矫玉田、徐栋、赵倩、舒启、乔方利、王辉武、吕连港、王道龙、王晓宇等。第2章由陈建芳和张海生统稿,参加编写的人员有:陈建芳、高众勇、陈敏、张海生、陈立奇、高生泉、李宏亮、庄燕培、金海燕、胡王江、杨伟锋、孙恒。第3章由何剑锋统稿,参加编写的人员有:何剑锋、刘子琳、张光涛、张芳、林凌、刘艳岚、李宏亮、高生泉、白有成、崔世开、徐志强、王永强、方晓琪、张永山、陈建芳等。第4章由王汝建统稿,参加编写的人员有王汝建、张涛、黄元辉、张海峰、冉莉华、邹建军、葛淑兰、陈志华、刘焱光、肖文申、梅静、孙焯忱、王昆山、石学法、高金耀等。第5章由卞林根统稿,参加编写的人员有卞林根、马永锋、逯昌贵、陆龙骅、汤洁等。第6章由李志军统稿,参加编写的人员有:雷瑞波、李志军、李娜、卢鹏、程斌;张蕊、刘普、杨清华、王先桥、李诗民、周明煜、杨宇、张占海、乔然、吕洪刚、张强、李娜、刘骥平、崔琳等。第7章由谢周清和康辉统稿,参加编写的人员有:武晓果、谢周清、Paul Lam、康辉、徐思琪、李冰、汤洁、卞林根、严鹏、逯昌贵等。

第三次北极考察与研究取得的一系列成果,是在国家海洋局的领导和重视、全体科考队员以及雪龙船船员共同努力下完成的。在本专著出版之际,特向给予本次科学考察指导的领导和专家及雪龙船全体船员表示衷心感谢!

张海生

2014年8月30日

目 录

第1章 物理海洋学	(1)
1.1 北冰洋加拿大海盆次表层暖水	(3)
1.2 加拿大海盆上层海洋热含量的差异分析	(20)
1.3 加拿大海盆上层海洋夏季淡水含量变化	(30)
1.4 加拿大海盆双扩散阶梯结构分布与热通量	(39)
1.5 夏季楚科奇陆架海域潜标观测	(47)
1.6 北白令海夏季冷水团的分布与多年变化	(57)
1.7 总结	(66)
参考文献	(67)
第2章 北冰洋生物地球化学	(77)
2.1 营养盐的分布特征	(79)
2.2 生源要素对浮游植物的控制机制	(101)
2.3 西北冰洋的边界清除作用	(106)
2.4 海水无机碳的分布及其调控机制	(114)
2.5 海气界面 CO ₂ 交换通量及其影响因素	(118)
2.6 总结	(128)
参考文献	(128)
第3章 北冰洋海洋生态系统及环境变化响应	(139)
3.1 北冰洋浮游植物生物量与初级生产力	(141)
3.2 微微型浮游生物群落	(162)
3.3 海冰生物群落	(177)
3.4 浮游动物群落组成和地理分布	(189)
3.5 楚科奇海大型底栖动物群落组成和空间分布格局	(194)
3.6 鱼类资源现状与潜力分析	(203)
3.7 总结	(204)
参考文献	(205)
第4章 海洋地质与地球物理	(213)
4.1 白令海近现代沉积学研究	(215)
4.2 白令海晚第四纪古海洋学研究	(227)
4.3 西北冰洋近现代沉积学特征	(246)
4.4 西北冰洋晚第四纪古海洋与古气候	(273)
4.5 鄂霍茨克海晚第四纪古海洋学研究	(295)
4.6 北极海域地球物理	(307)
4.7 总结	(320)
参考文献	(322)

第5章 北冰洋大气边界层过程 (345)

5.1 北冰洋浮冰区湍流通量及参数化 (348)

5.2 北极浮冰区对流层大气的垂直结构 (356)

5.3 总结 (364)

参考文献 (366)

第6章 北冰洋海冰物理特性 (371)

6.1 北极海冰表面特征 (373)

6.2 北极海冰界面过程 (390)

6.3 北极夏季海冰内部特征 (414)

6.4 总结 (420)

参考文献 (421)

第7章 北极大气环境与海洋污染物 (425)

7.1 考察航线上大气氯代有机物的空间分布和来源 (427)

7.2 考察航线上海洋边界层大气中汞的分布特征 (434)

7.3 北极航线上海洋气溶胶中碘形态分布特征 (438)

7.4 北极上空黑碳气溶胶的观测 (442)

7.5 总结 (450)

参考文献 (450)

第1章 物理海洋学

由于近30年来北极海冰处于快速减退时期，我国的北极物理海洋学研究更加重视北极海冰变化对海洋物理结构的影响，尤其是对北极海冰上层海洋结构和能量分配方面进行了多方面的研究。北冰洋的淡水收支对北大西洋深层水的形成有重要的影响，对维持大西洋经向翻转环流以及全球海洋输送带有重要作用；太平洋入流通过白令海峡进入北冰洋，对北冰洋的海冰有着重要的影响。

2008年中国开展的第三次北极科学考察覆盖面积广,到达纬度高,考察手段多,数据质量高,为研究北极物理海洋学的研究提供了良好的条件。本章将介绍根据中国第三次北极科学考察的CTD数据,同时结合多种类型的数据对北冰洋加拿大海盆夏季上层水体进行全方位的研究,包括垂直结构、时间变化、空间变化、淡水含量、热含量等特性的研究。同时,北冰洋是海洋双扩散现象的典型海域。由于北冰洋常年被海冰覆盖,实际观测数据稀少,尤其是能够体现双扩散现象的低速下放的CTD数据非常少,导致对北冰洋双扩散的研究不多。在2008年中国第三次北极科学考察中,对所有可能发生双扩散阶梯现象的深度采用低速下放,对温度与盐度剖面进行精细观测。这里我们利用这些数据,对北冰洋加拿大海盆双扩散阶梯结构的特征及其时空分布差异作出分析。第三次北极科学考察中布防的CN-1潜标,成功地观测到了楚科奇海出现的水温快速变化事件,并分析了其成因。潜标携带的ADCP提供了长期连续的测流资料,对所在海域的潮流、余流分布特征及流的斜压性作了分析。北冰洋的海水结构敏感地依赖于太平洋水的供给,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,本章也对白令海冷水团的结构和分布进行了深入系统的研究。

1.1 北冰洋加拿大海盆次表层暖水

1.1.1 加拿大海盆上层海洋夏季温度结构及其年际变化

海冰是影响北极气候的关键因素,是北冰洋海气相互作用的决定性因素之一。影响北极气候过程的另一个重要因素是海水的温度结构,冰下海水对太阳辐射的吸收是海-冰-气相互作用的能量基础,在很大程度上影响海冰的消融过程,从而影响气候过程。

根据Aagaard等(1985)的水团分类标准,北冰洋加拿大海盆在垂直方向上存在三个水团:一是低温低盐的北极表层水(0~200 m);二是高温和相对高盐的北极中层水(200~900 m),也称为大西洋水AW(Karcher et al., 2002);三是相对低温但高盐的北极深层水或底层水(900 m至海底)。在加拿大海盆,冰下海水通常有两个温度极大值。第一个在60~80 m左右的深度,在冬季对流混合层之下,起源于太平洋(Fedorova and Yankina, 1964),早期被称为太平洋夏季水(Coachman and Barnes, 1961)。按照其来源可以细分为阿拉斯加沿岸水(ACW)(Walsh et al., 1989)和白令海水(BSW)(Coachman et al., 1975)。不考虑其来源,这个温度峰被定义为浅层温度极大值(Shallow temperature maximum, STMs)(Shimada et al., 2001)。第二个温度极大值在300~600 m范围内,属于大西洋水,是来自大西洋的下沉水,随北极环极边界流输送到加拿大海盆,在整个加拿大海盆都存在。以往对STM的研究比较多,在楚科奇海东岸(Paquette et al., 1981)、加拿大海盆(Swift et al., 1997)以及波弗特海(Muench et al., 2000)等区域均观测到浅层温度极大水,其热量在流动过程中逐渐减少(Steel et al., 2004)。在两个温度极大值之间150 m左右的深度上存在冷水核,温度接近冰点。冷水核被认为是陆架上冬季结冰析盐形成的高密度水流入深海盆并发生潜沉的结果(Aagaard et al., 1985)。

近年来的大量观测表明,夏季在加拿大海盆冰下10~30 m的深度普遍出现另外一个温度极大值。图1-1显示,这个温度峰与其下部的浅层温度极大水有明显的区别,温度峰的垂向范围不大,温度极大值高于冰点,但低于STM和AW的温度,大多数时候甚至低于-1℃。我们将位于20 m附近的温度峰称为次表层暖水(赵进平等, 2003)。这个温度峰与其下的STM温度峰有一个温度极小值分隔(Jackson et al., 2010)。

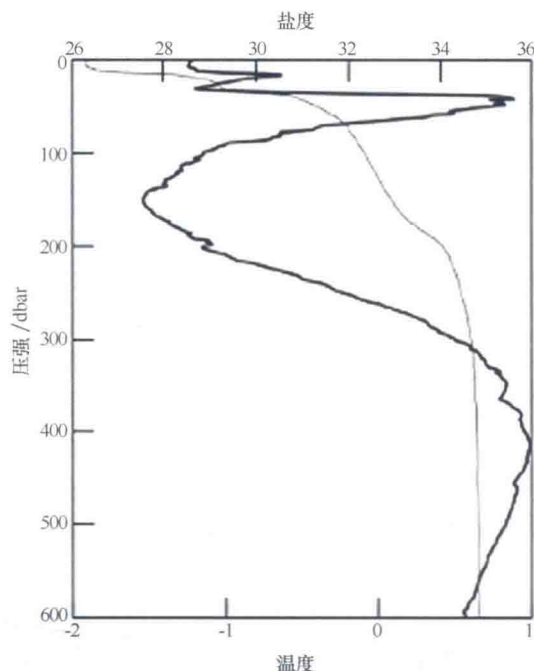


图 1-1 加拿大海盆存在次表层暖水的上层海洋温盐垂直结构

粗实线为温度，细实线为盐度，站位：75°35.26'N，56°17.05'W（2006 年 8 月 19 日）

次表层暖水现象早已被注意到。1975 年 4 月至 1976 年 5 月的 AIDJEX 获得的数据显示，在加拿大海盆的夏季，25 m 深度附近存在一个温度极大值（Maykut and McPhee, 1995; McPhee et al., 1998）。Guay 和 Falkner（1997）及 Shimada 等（2001）认为次表层暖水来源于夏季陆架径流，即阿拉斯加北部的马更些河。另一种观点认为（Maykut and McPhee, 1995; Kadko, 2000），由于太阳辐射透过海冰，使冰下海水不断得到加热而升温。赵进平等（2003）依据 1999 年北极科学考察的数据提出了次表层暖水的概念，即穿透海冰进入海水的太阳辐射能是次表层暖水的主要热源，海冰对海洋的冷却是主要热汇，建立了次表层暖水形成机制的一维物理模型，并给出解析解。王翠等（2004）将该模式的结果推广到无冰水域，证明即使海冰融化，只要没有发生大风搅拌，北冰洋的低气温也可以导致次表层暖水的发生；开阔水发生的次表层暖水极值比海冰覆盖海域高得多。陈志华和赵进平（2010）用冰海耦合柱模式模拟了厚冰、薄冰、冰间水道、冰藻等条件下生成的次表层暖水。结果表明，薄冰和冰间水道是形成次表层暖水的主要能量通道，冰层越薄，水道面积越大，次表层暖水的温度变化幅度越大。Jackson 等（2010）给出了更贴切的称呼，叫近表层温度极大值（NSTM）。

本节利用 1993—2010 年间的 CTD 数据研究北极加拿大海盆次表层暖水现象的分布规律及其多年变化，对次表层暖水的形成机理进行深入探讨。研究的数据跨度为 18 年，涵盖了 1993—2010 年间加拿大海盆的绝大部分 CTD 数据，包括：美国海洋数据中心（National Oceanographic Data Center）海洋气候实验室（OCL）发布的 1993—2002 年世界海洋数据集 05（World Ocean Database 2005）；西北冰洋联合气候研究计划（Joint West Arctic Climate Study, JWACS）和美国波弗特环流观测系统计划（Beaufort Gyre Exploration Project, BGEF）支持的加拿大海盆数据集 LSSL（2003—2010 年）（Proshutinsky et al., 2002）；1999 年、2000 年、2002 年、2004 年日本海洋—地球科学技术局（Japan Agency for Marine - Earth Science and Technology, 简称 JAMSTEC）发布的数据以及 2003 年、2008 年和 2010 年中国北极科学考察

(CHINARE) 的数据。

1.1.1.1 加拿大海盆上层暖水结构

上层海水是从表层到冷水核 (150 m 左右) 之间的水体。太阳加热作用、风的混合作用、平流及冰-海洋-大气之间的作用都发生在这一水层。该层水体结构的变化不仅是海冰和大气变化的结果,同时也反馈给海冰融化及大气的变化。本节将讨论加拿大海盆上层海水的温度结构,并以此为基础讨论加拿大海盆夏季水体的变化。

1.1.1.2 次表层暖水结构

冬季结冰析盐过程引起的对流混合在上层海洋形成对流混合层,混合深度可达 50 m 左右,混合层的水温基本处于冰点。图 1-2 是 1999 年 4 月观测的两个代表性站位,表明冬季对流混合层以下的海水有两种基本结构:一种是有 STM 的水体,即在 60~80 m 深度上存在温度极大值 (图 1-2a),主要发生在加拿大海盆西侧的大范围海域;另一种是无 STM 的水体 (图 1-2b),该冷对流层与 150 m 深的冷中心相连,维持冰点的温度。这种类型的水团说明该海域没有 PW 流入或者原有水团被冬季太平洋水所取代。这两种基本结构是形成夏季次表层暖水的背景场。

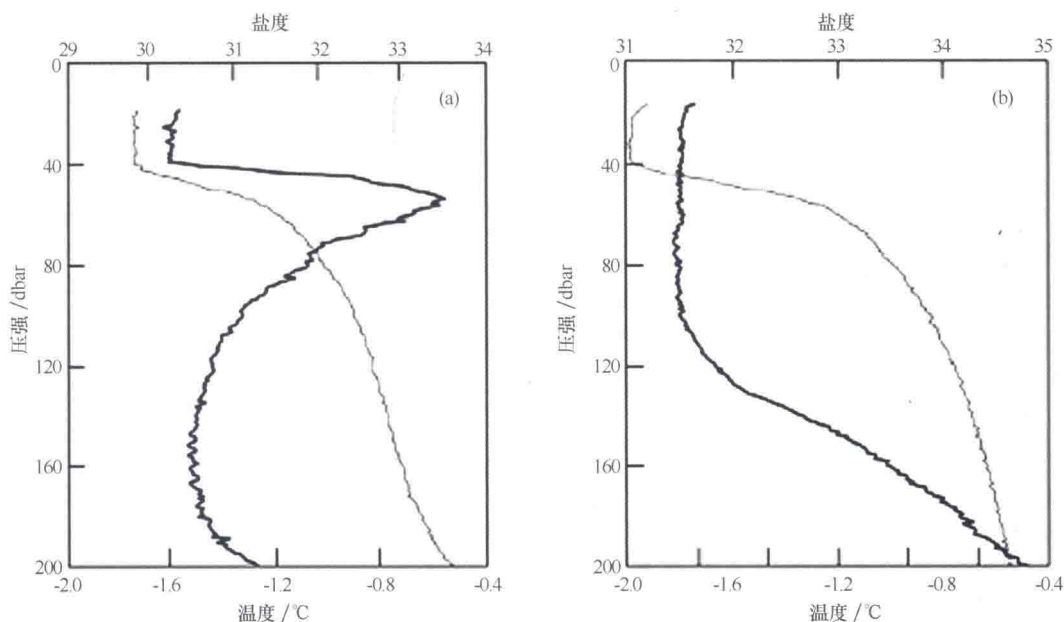


图 1-2 冬季保留水的两类基本结构

粗实线为温度,细实线为盐度。(a) 有 STM 的对流混合层, $75^{\circ}15.40'N$, $156^{\circ}27.00'W$ (1999 年 4 月 17 日); (b) 无 STM 的对流混合层, $85^{\circ}36.50'N$, $167^{\circ}08.00'W$ (1999 年 4 月 20 日)

春季开始后,太阳辐射穿透海冰进入冰下海水,在冰下形成次表层暖水。在冰水交错的海冰边缘区和冰间水道进入更多的太阳辐射能,次表层暖水的峰值得到加强。图 1-3 绘出了次表层暖水的温度分布,对应于冬季的两种温度背景场,冰下海水存在两种基本的次表层暖水结构:一种是有 STM 的次表层暖水,呈现典型的 NSTM + STM 结构 (图 1-3a);另一种是无 STM 的次表层暖水 (图 1-3b)。结果表明,不论是否存在 STM,在对流混合层之内都可以发生次表层暖水。次表层暖水出现在 40 m 水深以浅,与位于 60~80 m 的 STM 有明显区别。冰下的次表层暖水温度峰值通常很低,海冰融化、海冰密集度降低,海冰减薄,次表层



暖水的温度会升高。由于低盐的融冰水被保留在海洋的表层（通常在 10 ~ 20 m 以浅），并受到海冰拖曳等作用而混合均匀，因此在融冰水之下会存在一个强且薄的盐跃层。由于盐跃层的弱混合性，使得 NSTM 得以发生并维持下来。

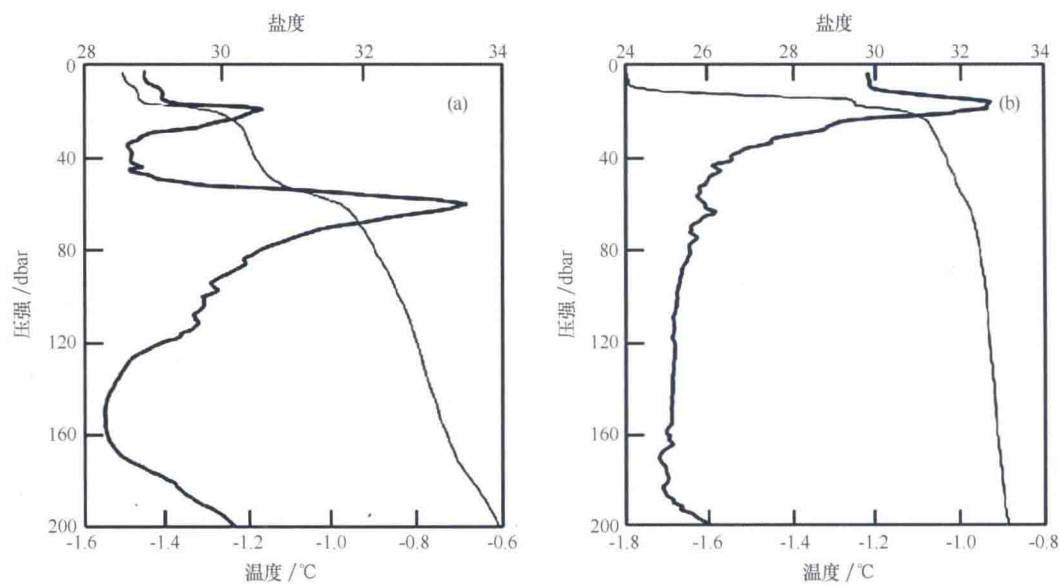


图 1-3 次表层暖水的两类基本结构

在未受大风扰动的开阔水域，只要气温低于水温，就可以很快地形成次表层暖水，而且温度峰值要远高于海冰（图 1-4），观测到的最大温度达到 5℃ 以上，这也再次证实了 NSTM 是太阳辐射和表面冷却共同作用的结果。

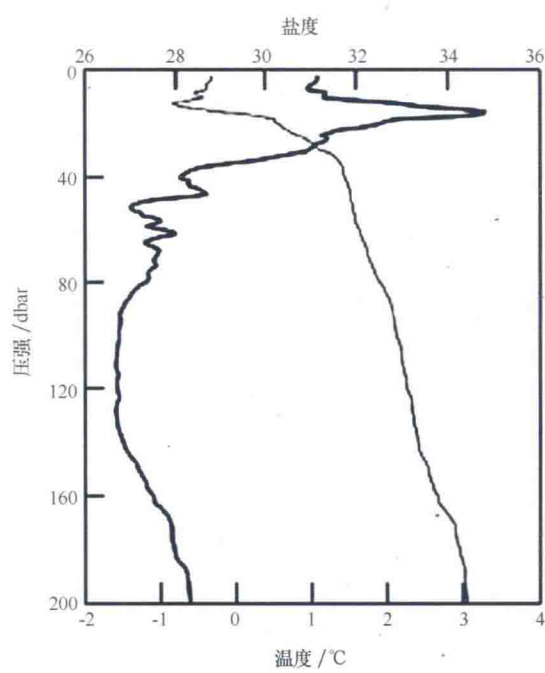


图 1-4 开阔水域的 NSTM
73°1.56'N, 158°59.28'W (1999 年 9 月 19 日)

NSTM 是一个动态的过程,分为形成、加强和消失阶段。Jackson 等 (2010) 对 NSTM 的定义实际上适用于成熟阶段的 NSTM。初期的 NSTM 的温度峰非常微弱,但是却代表了 NSTM 年周期变化的一个重要的阶段 (图 1-5)。海冰覆盖下的 NSTM,由于表层海冰的相对稳定性而呈现单峰结构。但在无冰的开阔水域, NSTM 则可能存在多峰结构,如图 1-6a 中的双峰结构和图 1-6b 中的三峰结构。我们推测这种多峰结构是由于表层冷源的变化造成的。

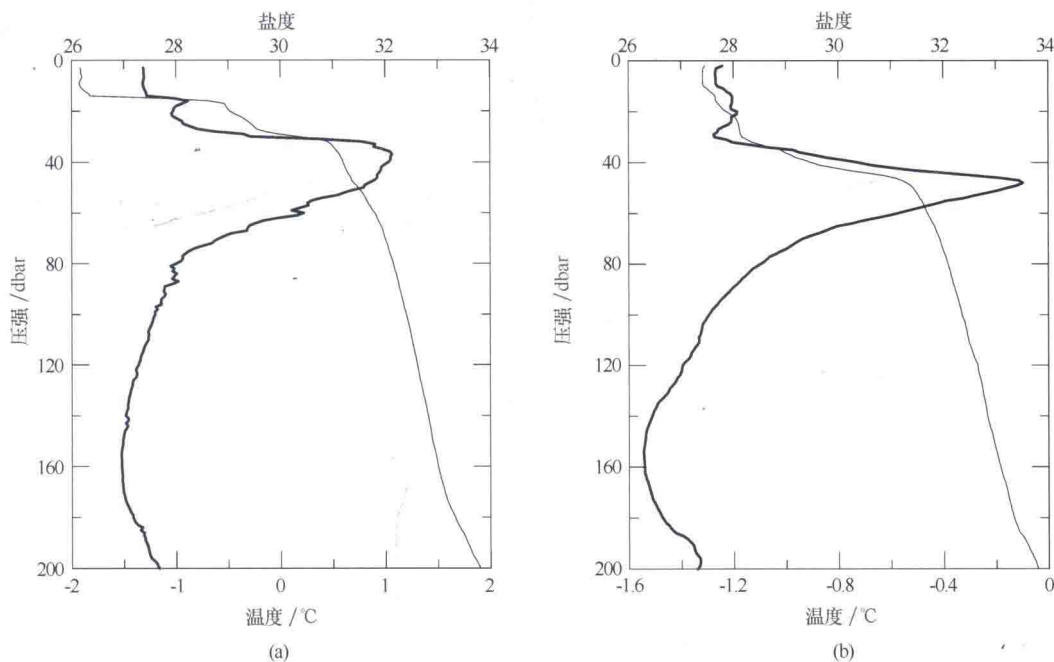


图 1-5 正在形成的次表层暖水

粗实线为温度,细实线为盐度。(a) 75°35.26'N, 156°17.05'W (2006 年 8 月 19 日); (b) 74°59.82'N, 139°59.34'W (2003 年 9 月 2 日)

因此,只要太阳辐射加热和表面冷却同时存在,无论是在海冰覆盖的海域还是无冰海域, NSTM 都可能发生。由于没有风的扰动和震荡,海冰覆盖下的 NSTM 比开阔水域的更加稳定,持续的时间更长。在厚冰区,没有足够的太阳辐射透射海冰加热海水不能形成 NSTM。而在开阔水域,如果气温高于水温,缺乏持续的冷却作用也无法形成 NSTM。

在夏季,太阳辐射穿透薄冰及冰间水道是上层海水的主要热源 (Maycut and Mcphee, 1995; Macphee et al., 1998; Kadko, 2000; Kadko and Swart, 2004)。在全球气候变暖的影响下,北极海冰也经历着快速变化,如气温升高,海冰面积 (Stroeve et al., 2007; Perovich et al., 2007) 和冰厚减小 (Rothrock et al., 1999; Lindsay and Zhang, 2005)。尤其是 2007 年海冰面积显著下降了 37%。这些变化都极大地影响着 NSTM 的结构。NSTM 不仅与太阳辐射有关,也与表层冷却密切联系。如果没有表层冷却,温度极大值就会出现在表层。不论是海冰覆盖海域还是开阔水体,只要有相当部分的太阳辐射能进入海水,就形成了辐射加热;海面不论是海冰还是大气,只要温度低于海水,就可以形成海面冷却,都可以形成次表层暖水结构。

1.1.1.3 夏季风生混合层结构

在无冰水域,大风搅拌会形成风生混合层,通常达到 15~20 m 左右的深度。风生混合层的温度由气温高低决定。在冷的条件下,会相应地生成冷的风生混合层,这种混合层是极区夏季典型的上层海洋结构 (图 1-7a)。有时也会形成相对暖的风生混合层 (图 1-7b)。混合层水可

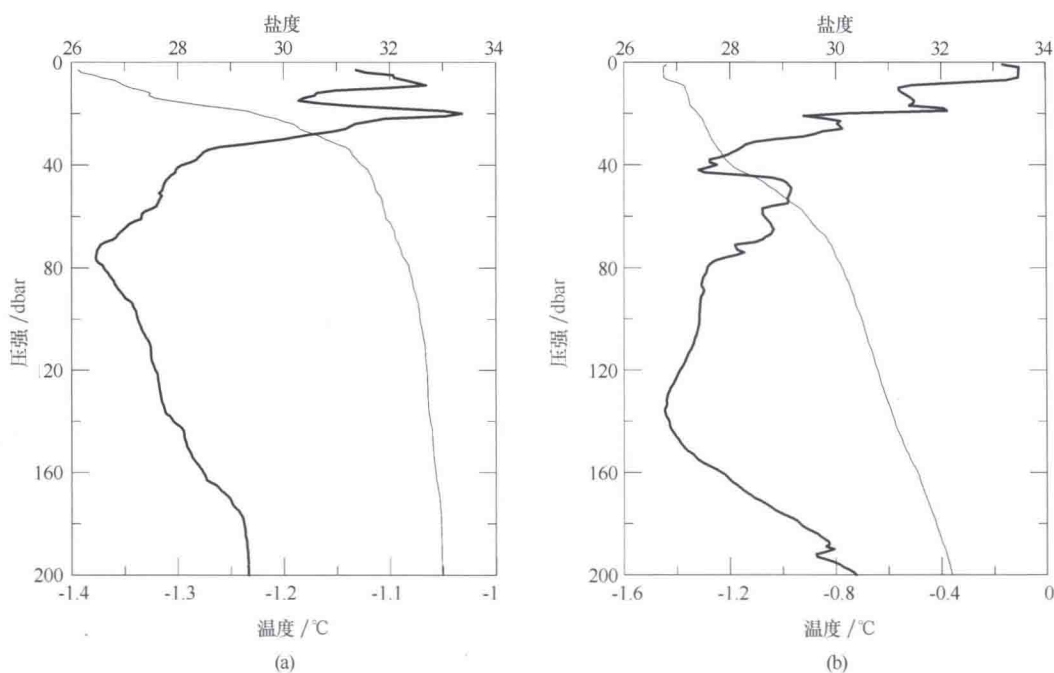


图 1-6 次表层暖水的多峰结构

粗实线为温度，细实线为盐度。(a) 69°49.31'N, 99°19.73'W (2006 年 7 月 31 日); (b) 73°46.61'N, 129°58.39'W (2007 年 7 月 29 日)

能有三种来源：一是太平洋水；二是河流径流；三是局地融冰水。在开阔水域，这三种类型的水体非常不易区分，有时可以采用同位素分析来解决混合率的问题 (Ortiz et al., 1996)。

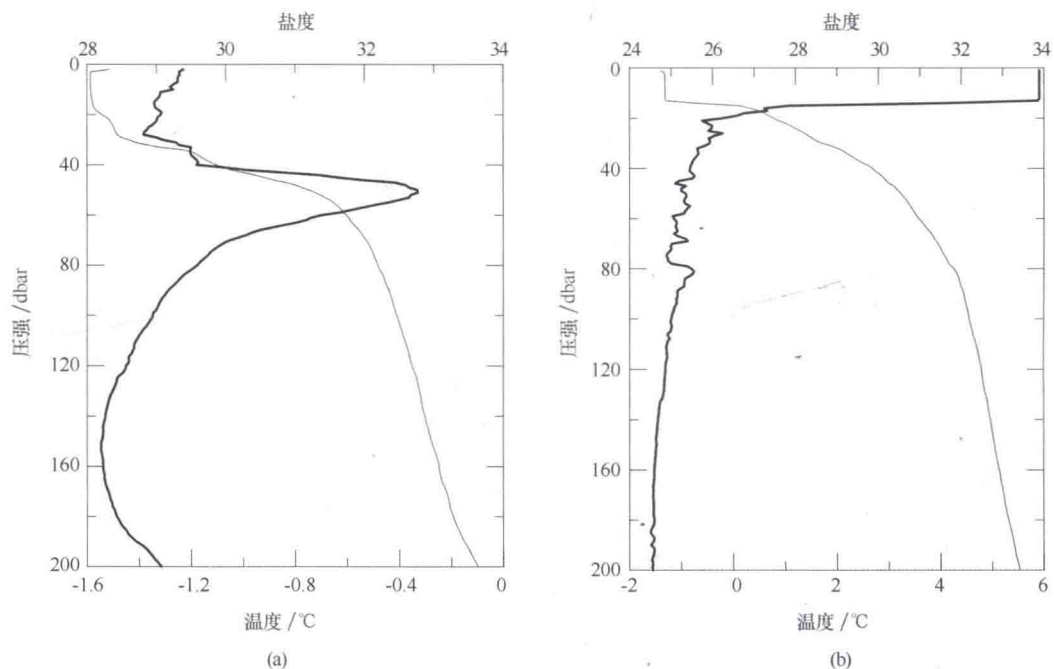


图 1-7 冷风生混合层 (a) 和暖风生混合层 (b)

粗实线为温度，细实线为盐度。(a) 75°02.70'N, 143°16.86'W (2003 年 8 月 30 日); (b) 73°00.00'N, 150°00.01'W (2008 年 7 月 26 日)