



北极海冰快速变化： 观测、机制及其天气气候效应

张占海 编著

BEIJI HAIBING KUAISU BIANHUA:
GUANCE, JIZHI JI QI TIANQI QIHOU XIAOYING



海军出版社

北极海冰快速变化： 观测、机制及其天气气候效应

张占海 编著

海洋出版社

2016年·北京

图书在版编目(CIP)数据

北极海冰快速变化:观测、机制及其天气气候效应 /
张占海编著. — 北京:海洋出版社, 2016.3
ISBN 978-7-5027-9379-1

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(2016)第041044号

责任编辑:白 燕 张 荣
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

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷 新华书店经销

2016年3月第1版 2016年3月第1次印刷

开本:889mm×1194mm 1/16 印张:12.5

字数:300千字 定价:98.00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

致 谢

本书得到下列项目资助：

国家自然科学基金（40930848）

海洋公益性行业科研专项项目（201205007）

Advancing Modelling and Observing solar Radiation of Arctic sea-ice understanding changes and processes（193592）

编写委员会

编写组组长：张占海

编写组副组长：李 群 雷瑞波

编写组成员（按姓氏笔画）：

王可光	卢 鹏	刘 娜	刘骥平	张 璐
宋米荣	杨清华	杨 宇	李志军	李 娜
赵杰臣	隋翠娟	谢红接	程 斌	魏立新

前言

海冰不仅是极地气候系统的重要组成部分,也是全球气候变化最敏感的组分之一。海冰的高反照率大大减少了极地对太阳辐射的吸收,使极地成为全球气候系统的热汇及冷空气的源地;海冰的存在,隔绝了海洋与大气的直接联系,大大减弱甚至阻止了大气与海洋之间热量、动量、水汽及二氧化碳等的交换;海水的冻结析盐过程使海洋表层盐度增加,而海冰融化则会引起海洋表面盐度的减少,这提供了海冰和海洋之间的直接联系,从而影响海洋垂直和水平温盐环流的形成和强度,进而影响全球的海洋温盐环流,特别是北大西洋深层水和南极底层水。因此,即使很小的海冰面积变化都可能会对极地乃至全球气候产生重要的影响。

伴随着全球气候变暖,在过去的几十年,北极也明显变暖,且其变暖速率是全球平均变暖速率的2~3倍,被称为“北极放大效应”。这种变暖效应与北极海冰的变化存在着密不可分的联系(Graversen et al., 2008; Bekryaev et al., 2010; Kumar et al., 2010; Miller et al., 2010)。Parkinson 和 Cavalieri (2002) 用 1979 年 1 月至 1999 年 12 月卫星观测数据计算得到的北极总的海冰覆盖范围每年减少约 $0.33 \times 10^6 \text{ km}^2$, 将数据延长到 2002 年后, 每年减少趋势约为 $0.36 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。Liu 等 (2004) 也计算得到了类似的结果, 北极海冰覆盖范围每年减少约 $0.31 \times 10^6 \text{ km}^2$, 海冰面积每年减少约 $0.35 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。Comiso (2008) 利用 1978 年 11 月至 2006 年 12 月的卫星观测数据计算得到, 北极海冰覆盖范围和面积每 10 年减少约 3.4% 和 4.0%。此外 Comiso 还计算了 1998—2007 年的北极海冰面积变化, 发现与气候变化平均相比, 海冰面积 10 年间减少了 10.7%。北极海冰覆盖范围的减少在近几年有加速的趋势, 2007—2013 年 7—12 月的海冰覆盖范围远远低于 1979—2000 年的气候变化平均分布, 9 月之后海冰的恢复增长过程也非常缓慢。2007—2013 年也是自有卫星观测记录以来 9 月北极海冰覆盖范围最低的 7 年。2012 年 9 月, 北极海冰覆盖范围是有观测记录以来的最低值, 只有 $3.41 \times 10^6 \text{ km}^2$, 相比气候平均, 减少了 $3.29 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约 49%。北冰洋海冰快速变化及其预测已经成为国际上最为热点的气候环境变化问题之一。

北极海冰的显著变化不仅体现在海冰覆盖范围和覆盖面积的减少, 海冰厚度在过去的几十年中也发生了显著的变化。与 1958—1976 年比较, 20 世纪 90 年代中期 (1993—1997 年), 北冰洋海冰的平均厚度变薄了约 1.3 m (Rothrock et al., 1999)。Lindsay 和 Zhang (2005) 及 Rothrock 等 (2003) 根据观测和模式模拟得到, 20 世纪 80 年代末开始, 北极海冰开始变薄, 特别是在楚科奇海—波弗特海—格陵兰岛的海岸线沿线, 海冰变薄非常显著。Kwok 等 (2009) 结合潜艇和卫星观测数据, 分析了 1958—2008 年的北极海冰厚度变化, 结果显示, 北极海冰有长期变薄的趋势, 其中 1980 年冬季北冰洋的海冰平均厚度为 3.64 m, 而 2008 年冬季, 北冰洋平均海冰厚度只有 1.89 m, 减少了 1.75 m。深入了解海冰的这种快速变化机制及其反馈因子, 对改进海—冰耦合模式, 提高海冰快速变化对极地及中高纬度地区的天气气候影响的认识, 特别是海冰快速变化对我国气候和灾害天气的影响, 具有重要的意义。

北冰洋海冰快速变化与海洋有着密切关系, 相互作用过程非常复杂 (Hakkinen, 1993 ;



Delworth et al., 1997)。一方面，海冰融化增加了开阔水道面积，使海洋热容量增加，进而加剧海冰融化；另一方面，海冰范围和厚度减小已引起北冰洋上层水发生变化，例如，加拿大海盆海冰厚度距平减小，使上混合层近年来显著淡化（McPhee et al., 1998），也是夏季海冰融化范围增大的重要原因之一。北冰洋海冰快速变化的科学问题可以概括为两大类：一类是北冰洋海冰自身的复杂变化；另一类是北冰洋海冰与外界系统（大气、周边大洋、陆地）相互作用产生的变化。外界系统影响北冰洋海冰的主要过程有：太平洋入流向北冰洋的输送，大西洋与北冰洋的水体交换，欧亚和北美大陆的入海径流以及北冰洋海冰对大气环流变化的响应。同时，北冰洋海冰变化又会对外界系统有着重要的反馈作用（Gerdes, 2006），特别是在极地存在着重要的反馈过程，包括：表面反照率/冰面融池的反馈作用、冰间水道的反馈作用和云/辐射的反馈机制。

我国地处季风最明显的气候带，一方面受南来潮湿气流影响，水汽充沛，在合适的天气条件下，易发生洪涝；另一方面，中、高纬度西风带槽脊的变化，不断使干冷空气南下，在一定天气条件下又易产生大范围干旱。在全球变暖的背景下，我国极端干旱或异常强降水事件等频繁出现。例如，1998年洪涝、1999年以来北京地区连续9年干旱，频繁出现的沙尘暴以及自1965年以来我国华北地区夏季降水的持续减少、2006年夏季四川、重庆百年不遇的特大旱灾、2008年年初南方雪灾、2008年年底至2009年年初大范围干旱等，这些都直接影响了我国的社会经济发展和人民生活。

这些自然灾害的频繁出现与西风带长波槽脊变化、北极冷空气活动和北极大气环流变化有密切关系，而北极冷空气活动又直接受下垫面（海洋和海冰）变化的影响。目前，我国科学界对影响中国气候的主要因素，如季风系统、青藏高原、ENSO事件等有了较为深刻的认识。对北极海冰变化对中国气候的影响也有了一些初步的认识，但是较为薄弱。现有研究成果表明北冰洋海冰变化可以通过影响大气环流、气旋活动以及西北太平洋副热带高压等进而影响我国的气温、长江流域降水以及东亚冬季风强弱等（Wu et al., 2001；武炳义等，2001，2004；Wu, Wang, 2002；宋华，孙照渤，2003；Zhao et al., 2004；董新宁，孙照渤，2006；Liu et al., 2007）。但是这些研究中，首先，缺乏海冰变化剧烈的北冰洋太平洋侧海冰变化对中国气候的影响；其次，其研究的时间范围也多集中在2000年以前，对近10年来北极海冰巨变对中国大气环流及气候的影响规律研究涉及较少。

北极气候的显著变化在国内外引起广泛关注。目前正在开展的国际极地年（International Polar Year，以下简称IPY）科学行动，将北冰洋的研究作为重点内容。IPY最大的核心计划之一——IAOOS（Integrated Arctic Ocean Observing System，以下简称IAOOS）整合了近20个国家的50多个IPY科学计划提案，形成了目前最完整、科技含量最高、参加国家最多的北冰洋观测研究计划，将为国际北极研究留下重要科学遗产。为了实施IAOOS计划，在欧共体资助下，欧洲12个国家的45个研究机构共同执行了庞大的DAMOCLES（Developing Arctic Modeling and Observing Capabilities for Long-term Environmental Studies）计划，旨在大大提高可持续性研究北极环境变化所需的观测与模拟预测能力。美国在IPY期间增加1.2亿美元用于目前其正在牵头实施的大型国际计划“国际北极环境变化研究项目”（International Study of Arctic Change）和“北极观测系统网建设”（Sustained Arctic Observing Network）；加拿大政府在IPY期间增加5400万美元用于支持JOIS（Joint Ocean Ice Study）计划。可见，北极已

成为全球气候环境变化问题研究的重要科学问题所在和热点区域。

近 10 年来,我国实施了 5 次北极科学考察。2008 年实施的中国第 3 次北极科学考察与欧盟 DAMOCLES 项目签署了双边合作备忘录,共享各自现场观测数据。在科研方面,国内有关单位开展了北极海冰、海洋和气候模式方面的研究工作。围绕北冰洋海冰变化过程、大气边界层和大气环境、海—气界面通量交换、海洋环流的结构等科学问题,进行了多学科综合观测和研究(中国首次北极科学考察报告,2000;陈立奇,2003;张占海,2004)。主要研究结果包括:通过温、盐结构分析,发现并分析了楚科奇海台中层水的增温现象(赵进平等,2003,2004),证实加拿大海盆是北极淡水的主要储存区之一(邢娜等,2002;陈敏等,2003)。利用浮冰站气象观测资料,研究了浮冰区热量平衡参数的变化(Zhou et al., 2006; 卞林根等,2003)和大气边界层结构特征(曲绍厚等,2001)。观测并分析研究了太平洋入流在北冰洋的分布(Li, 2005; Shi, 2005)及白令海—楚科奇海海冰范围变化特征(胡宪敏等,2007),利用航空遥感照片和海面实测资料分析了融冰季节的海冰分布对海面热通量的影响(赵进平,任敬萍,2000)。发展了海冰—海洋耦合数值模式,并开展了大量数值模拟研究。利用我国北极考察冰雷达观测资料,分析了海冰厚度分布的空间变化特征(孙波等,2002)。此外,中国—芬兰联合在海冰热力学、动力学和数值模式等方面开展了卓有成效的研究(Zhang, 2000, Cheng et al., 2008),研究成果还被芬兰和瑞典冰服务中心作为业务化模式应用于波罗的海海冰数值预报。在参加中国第 3 次北极科学考察中,对北冰洋海冰区表层温度、海冰密集度、厚度、融池等空间特征,海冰底面融化、侧面融化以及冰面反照率等局部特征和冰—气之间的交换上有了新的认识。

2003—2006 年,项目组主要成员承担并圆满完成国家自然科学基金资助的重点项目“北冰洋海冰物理过程和冰—海洋耦合模式研究”,集成运用高新技术开展了极区海冰综合观测,研究了北冰洋气—冰—海相互作用的物理机制,提出了具有观测依据的创新性参数化方案,完善了海冰模式物理过程的基本框架,发展了冰—海耦合模式,模拟的北冰洋海冰季节与年际变化与实测资料分析场基本一致(Liu et al., 2005),初步分析研究了北冰洋海冰与气候变化的关系,揭示了北太平洋海冰变化的两个主模态,发现第一模态比北极涛动能更好地揭示西伯利亚变暖现象,第二模态与东亚冬季气候变化密切相关(Liu et al., 2007)。

本项目在上述工作取得的经验和成果基础上,集中我国主要的北极研究资源,结合 IPY 中国行动计划中的北极科学考察计划,充分利用国际合作条件和 IPY 数据共享机制,以观测研究为基础,深入研究海冰在不同时间和空间尺度上的快速变化特征,通过数值模拟和诊断分析研究冰间水道和冰面融池以及太平洋入流对北冰洋海冰变化的影响机制,探究北冰洋海冰快速变化对东亚气候和大气环流,特别是对我国重要灾害性天气过程形成的影响,提高我国在应对气候变化和减轻气候灾害方面的理论研究能力,为我国制定适应全球变化问题的对策提供科学依据。

中科院大气物理研究所

刘骥平

2015.5.26

目 录

第 1 章 近 30 年北极海冰的变化特征

1.1 引言	2
1.2 北极海冰变化研究现状.....	2
1.3 近 30 年北极海冰快速变化特征.....	4
1.3.1 北极海冰外缘线和分布范围变化	4
1.3.2 不同区域衰减特征和比较	13
1.4 结论	22

第 2 章 海冰快速变化特征参数和过程的现场观测

2.1 概述	24
2.2 海冰地理学分布	26
2.2.1 2008 年夏季北冰洋 140°—180°W 扇区海冰物理特征分布	26
2.2.2 2010 年夏季北冰洋 140°—180°W 扇区海冰物理特征分布	36
2.3 夏季北冰洋水道——海冰系统的热力学过程	44
2.3.1 现场观测	45
2.3.2 水道反照率	47
2.3.3 海水温度	48
2.3.4 浮冰侧部和底部物质平衡	48
2.3.5 讨论与结论	49
2.4 短波辐射通量观测	50
2.4.1 现场观测和数据处理	51
2.4.2 观测结果与分析	53
2.4.3 结论	58
2.5 海冰物质平衡过程观测	58
2.5.1 浮标的布放和运行	59
2.5.2 观测结果与分析	61
2.5.3 讨论	67
2.5.4 结论	71



2.6	海冰物理结构观测	72
2.6.1	数据与方法	72
2.6.2	观测结果与分析	74
2.6.3	讨论和结论	81
2.7	结论与展望	81

第3章 海冰变化机理研究

3.1	引言	84
3.2	北极表面反照率观测和数值模拟研究	84
3.2.1	研究方法	85
3.2.2	北极海冰反照率观测分析	87
3.2.3	北极海冰反照率模拟	90
3.2.4	总结	92
3.3	北极冰—海耦合模式物理过程参数化敏感性实验	92
3.3.1	冰雪反照率参数化方案	92
3.3.2	辐射穿透参数化方案	95
3.3.3	结论与讨论	97
3.4	太平洋入流水对西北冰洋上层海洋及海冰变化的影响	99
3.4.1	模型介绍	101
3.4.2	结果分析	103
3.4.3	结论	107

第4章 海冰动力学

4.1	引言	110
4.2	海冰分类	111
4.3	海冰漂移	113
4.4	海冰流变学	117
4.4.1	屈服曲线	119
4.4.2	流动法则	120
4.4.3	非塑性形变时的本构方程	122
4.4.4	海冰抗压强度	123
4.5	冰脊和水道的数值模拟	125
4.5.1	冰脊模拟	126
4.5.2	水道模拟	129

第5章 积雪—海冰热力学模式及其参数化方案

5.1	概述	136
5.2	积雪—海冰热力学解析模式	137
5.2.1	模式介绍	137
5.2.2	解析模式模拟水库冰冰厚	138
5.3	积雪—冰热力学数值模式	140
5.3.1	模式介绍	140
5.3.2	积雪—冰热力学数值模式表面热平衡方程及其物理量的参数化方案	141
5.3.3	雪/冰表面温度的优化算法	147
5.4	海洋热通量的参数化	152
5.4.1	海洋热通量的参数化	153
5.4.2	数值模拟	153

第6章 北极海冰快速变化对东亚及中国气候变化的影响研究

6.1	序言	158
6.2	北极海冰对中国及东亚冬季降水的影响规律和途径	160
6.2.1	引言	160
6.2.2	北极秋季海冰对中国冬季降雨的影响规律	161
6.2.3	北极秋季海冰对中国冬季降水的影响途径	163
6.2.4	结论和讨论	164
6.3	北极海冰变化在 2008 年初中国南方雪灾形成中的作用探索	166
6.3.1	序言	166
6.3.2	数据、大气环流模式和数值实验设计	169
6.3.3	数值模拟结果	169
6.3.4	结论和讨论	172
	参考文献	173

第1章 近30年北极海冰的 变化特征

本章编写人员为国家海洋环境预报中心：张璐、隋翠娟、赵杰臣。



1.1 引言

作为地球上唯一的极地大洋，北冰洋位于北极地区的中心区域，占北极地区面积的 60% 以上，是北极系统的主体。北冰洋表面绝大部分海域被海冰终年覆盖，平均厚度达 3 m（陈立奇等，2002）。海冰在海—气相互作用和大气及海洋间的热交换过程中起关键作用（彭公炳等，1992），它不但会反射来自太阳 80% ~ 90% 的热量，同时阻碍从海洋向大气输送热量。海冰的变化会给地球气候带来重要的影响（Untersteiner N et al., 1984；Jacques C J N et al., 2008）。研究表明，北极的温度和海冰覆盖率的变化是全球气候变化的预兆（Konstantin Y V et al., 1999；Koster E A et al., 1993），也就是说通过北极温度和海冰覆盖率的变化可以预测全球气候可能发生的变化（Acia, 2004）。

海冰作为北极气候变化最敏感的组成部分之一，也是预测未来全球气候变化最大的不确定因素之一。一方面，由于温暖变化使北极海冰面积减少，开阔水面增加，大洋吸收二氧化碳增加，减弱温室效应；另一方面，由于海冰对太阳短波辐射的高反射率，极大阻碍了北冰洋对太阳辐射的吸收作用（Parkinson, C.L. et al., 1993）；同时，覆盖于海水表面的海冰隔绝了大气与海洋的联系，大大阻碍甚至隔绝了大气与海洋之间热量、水汽以及动量的交换过程。

在利用卫星遥感技术进行长时间、大范围观测活动实施以前，研究和搜集北极海冰的资料非常困难。而自 1966 年发射了极轨气象卫星后，卫星的观测获取了长期、连续的海冰资料，使研究北极海冰的年际、年代际变化，进而对研究海冰与全球尺度的气候变化关系成为了可能（Parkinson C. L. et al., 1982）。

利用长期、连续的卫星遥感资料，通过气候诊断统计分析的方法，研究近 30 年北极海冰的快速变化趋势，分析海冰的年际、年代际变化特征，并通过对中国近 3 次北极科学考察的海冰调查结果进行分析总结，得到北极海冰在不同时间尺度和空间区域上的变化特征。

1.2 北极海冰变化研究现状

苏联的定点和船舶的海冰观测资料显示北极部分主要海区 1845—1976 年海冰的年际变化情况，发现各季海冰的年际变化基本趋势是一致的（彭公炳等，1992，见图 1-1）。20 世纪 50 年代中期至 60 年代初，北极海冰分布面积有所减小；其后几年，海冰面积略微扩大，至 1967 年，面积达到该时期的最大值。

Konstantin 等使用了来自伊利诺斯大学海冰组、俄罗斯南北极研究所、NOAA 气候预报中心、挪威南森环境遥感中心以及 NASA 戈尔德空间飞行中心的 5 种不同来源、不同覆盖区域和时段的全球海冰分布观测资料，分析后所得结果均十分相似，即 19 世纪 70 年代初到 80 年代中期，北极海冰面积年平均都在 $1250 \times 10^4 \text{ km}^2$ 上下变化；自 20 世纪 80 年代后期开始，北半球海冰面积迅速减少，至 90 年代中期，海冰面积仅约为 $1160 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，而且海冰的周期变化不明显（Konstantin et al., 1999）。进入 21 世纪以来，海冰持续缩减的趋势并没有缓解，反而更是屡创新低（Comiso et al., 2008），尤其是更易受环境变化影响的夏季北极海冰，缩减速率从过去的平均每年减少 0.3% 上升到 1.1%，2007 年更是一年间骤减了 8%。

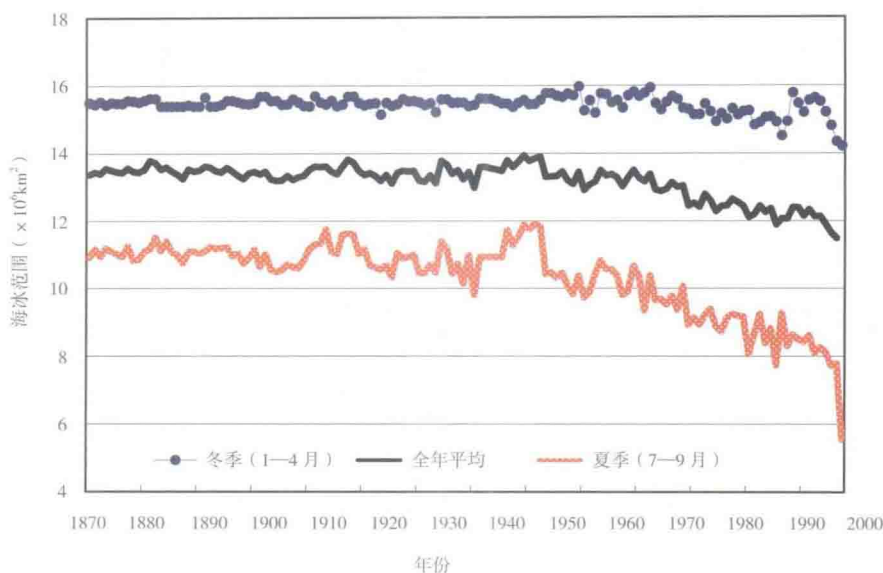


图1-1 1870—2007年北极海冰面积冬季、夏季和年平均逐年变化
(数据来源于<http://arctic.atmos.uiuc.edu/SEAICE/timeseries.1870-2007>)

最新遥感观测资料表明, 北极终年海冰的现存量(一年中北极海冰分布范围出现的最小值)从20世纪70年代以来下降了40%(Comiso et al., 2008)。如图1-2所示, 1979—2008年, 北极夏季海冰(9月)现存量的变化趋势为每10年下降11.1%。在此之前, Comiso 利用2000年以前的数据进行分析, 结果为每10年下降6.4%(Comiso et al., 2002), 而 Parkinson 等更早的分析结果还只是每10年下降3%(Parkinson et al., 1993)。

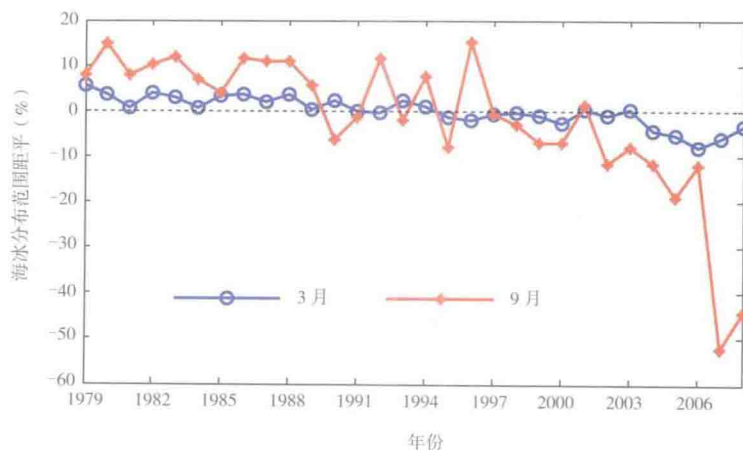


图1-2 1979—2008年, 3月(海冰净冰面积指数最大月份)与9月(海冰净冰面积指数最小月份)
北极地区海冰分布范围标准偏差百分比
(数据来源于NSIDC)

进入21世纪, 北极海冰范围自卫星观测以来的最小值纪录更是屡被打破, 2007年9月更是出现了 $4.28 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的极小值, 比起此前2005年9月的极小值纪录, 其缩减程度超过23%, 而与1979—2000年北极海冰范围平均值相比则缩减39%以上(Stroeve et al., 2007)。

近30年北极海冰的快速缩减已经引起了国际上的普遍关注, 各国学者都致力于寻找影响海冰变化的物理因素和驱动机制, 发展和完善全球和极地区域气候模式, 试图更加确切地模拟这种



快速变化的过程，预测未来继续变化的趋势。但随着时间的推移以及研究的不断深入，很多可以用来解释过去一段时期内海冰异常缩减的观点和结论，现在却不足以应对当前海冰的变化状况。如果说 20 世纪 90 年代之前，北极海冰变化受外界影响呈线性减少趋势，那么，随着海冰与气候系统之间各种正反馈效应的不断叠加，这种变化趋势，或许已经转变为一种指数减少的状态。Lindsay 等（2005）提出了这样的疑问：“是不是我们正在经历一个全新的气候变化阶段？”

1.3 近 30 年北极海冰快速变化特征

近 30 年，相比于地球上其他地区，北极的气候发生了更加显著的变化。如，大范围海冰持续缩减，格陵兰冰盖不断消融，气温普遍增暖，表层海水温度升高、盐度降低等，其中，北冰洋海冰的快速变化最受瞩目（陈立奇等，2002）。自 20 世纪 70 年代末开始，北极夏季海冰覆盖范围始终在不断减小，且最近几年减少的速度明显加快。特别是在 2007 年 9 月，海冰覆盖范围出现了有卫星观测以来的最小值，与 20 世纪 50—70 年代海冰夏季分布平均值相比，缩减程度达到了 50%。虽然 2008 年夏季的北极海冰覆盖范围并未如预测继续缩减，但海冰中的多年冰总量锐减，刷新了历史纪录的极小值（Perovich et al., 2009）。由于海冰是影响北极气候变化的最重要因子之一，因此，准确获取北极海冰的变化信息，进行研究分析，确定海冰变化对全球气候的响应，是研究和预测全球气候变化趋势的关键之一。

1.3.1 北极海冰外缘线和分布范围变化

1.3.1.1 海冰分布范围年际变化特征

计算海冰面积和海冰范围时，国内外大部分文献中习惯将密集度大于 15% 的区域计入有效格点面积，在本章的讨论中沿用这一惯例。同时，将密集度等于 15% 的格点相连成线，作为北极海冰外缘线，而海冰外缘线包围的区域总面积定义为海冰范围，区域中被海冰覆盖的面积总和定义为海冰面积。

根据上述定义，利用雪冰中心提供的 1979—2008 年海冰月平均密集度资料，分别求算北极各月 30 年平均海冰范围和海冰面积。如图 1-3 所示，灰色柱体表示海冰范围年际变化，灰蓝色柱体则表示海冰面积的变化；两条误差曲线上的误差分别表示海冰范围和面积在 30 年内各月距平的最大值。

无论是海冰范围还是海冰面积，最大值都出现在每年的 2—3 月间，最小值则出现在 9 月前后。与南极海冰不同的是，北极海冰一年内生长期和消融期基本相当，3 月到 9 月，海冰持续消融面积达到全年最小值，其后则不断生长，到翌年 3 月再次达到上年最大覆盖范围。对于海冰季节的划分，Clare 和 Walsh 等将 1—3 月定义为冬季，4—6 月为春季，7—9 月为夏季，10—12 月为秋季（Deser et al., 2000）。但是，从海冰每个月的覆盖面积的变化率上（图 1-4）不难看出，3 月的海冰范围和面积的变化率已经基本接近于零。这也就意味着，在整个 3 月，海冰已经由生长期过渡到了融化期，且融化期一般开始于前半月；除此之外，虽然 9 月的变化率显示着当月海冰仍然在不断减少，但对比 10 月显著的增长率，可以判断出 9 月也是海冰从融化期过渡到生长期的月份，而生长期的开始也往往集中在 9 月上旬（图 1-5）。如果将北极海冰整体开始消融的月份看做是北极春季的开始，那么，在讨论海冰季节变化时，将春季

定义为3—5月,夏季为6—8月,秋季为9—11月,冬季为12—翌年2月,则能够更加突出海冰在不同季节的变化特征。这样,在研究海冰年代际变化过程中减少人为分季引入的干扰信号,可以更加准确地把握气候变化要素。

虽然海冰范围和海冰面积都可以用来表示海冰的冰情轻重,但海冰范围更加强调北极海冰南向扩张或北向缩减的情况,在分析海冰范围变化的基础上,海冰面积可以体现出冰区内融池以及开阔水比例的高低。从计算结果中不难发现,北极海冰范围和海冰面积无论在年际变化还是在年代际变化趋势中都体现出良好的一致性,因此,在本章节讨论中,主要以海冰范围作为研究全北极海冰变化趋势的变量;而在后面进行划定区域的海冰变化特征分析时,由于区域面积固定,则比较适合用海冰面积来反映海冰的变化特征。

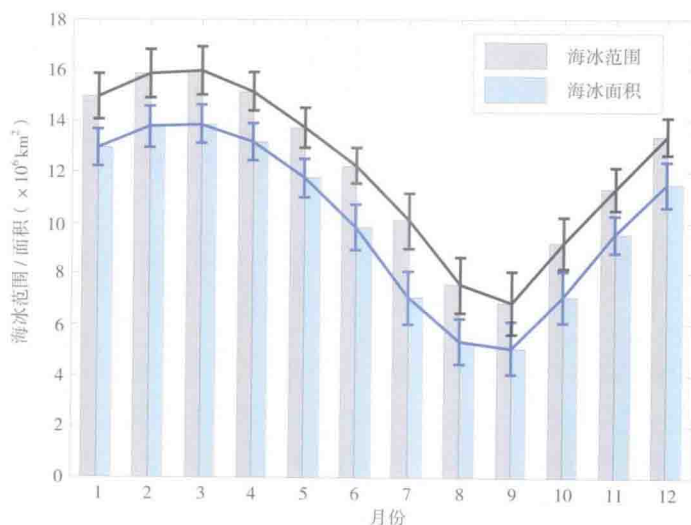


图1-3 1979—2008年北极月平均海冰范围、海冰面积年际变化
(数据源于NSIDC)

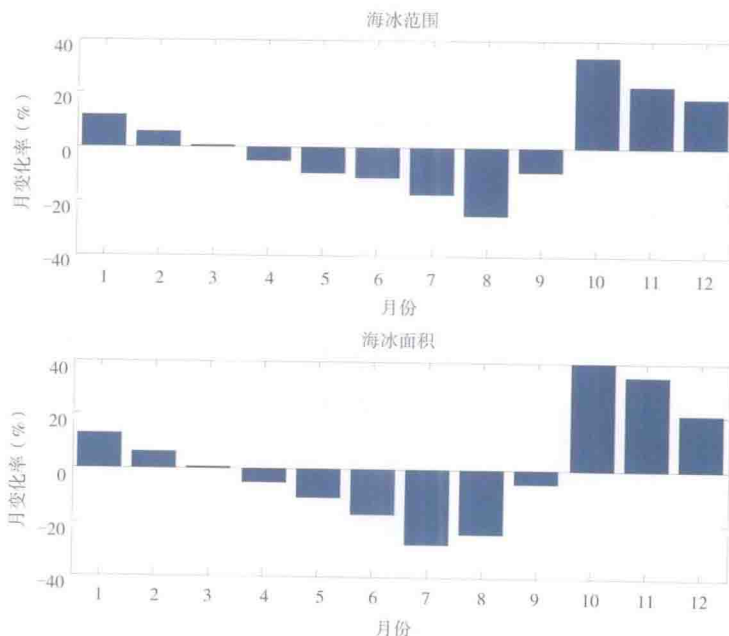


图1-4 北极海冰范围、海冰面积月变化率
(数据源于NSIDC)

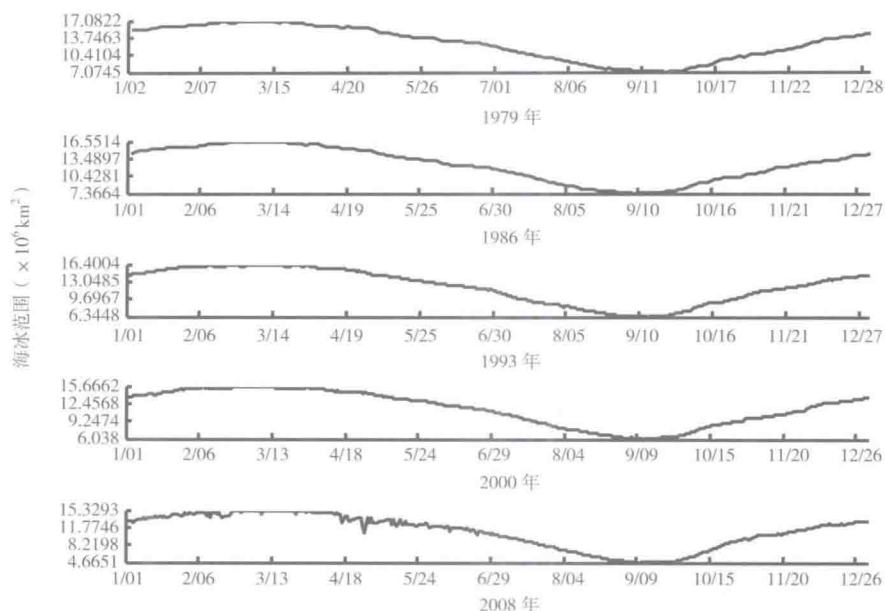


图1-5 1979年, 1986年, 1993年, 2000年, 2008年北极日平均海冰范围年际变化
(数据源于NSIDC)

将不同月份海冰资料按前文分类方法进行季节划分, 可以得到每个季节的海冰季平均分布范围。把季平均海冰范围边界, 即海冰外缘线分别绘制在地图(图1-6)中, 海冰外缘线的季节变化体现出较强的地域性, 这种变化呈现出经向变动特性。夏季海冰外缘线的年际纬向变动多数超过 5° 个纬度, 在鄂霍次克海地区, 这种变动甚至超过了 10° 个纬度。北极海冰之所以呈现出显著的季节变化, 并且季节变化显示出经向变动特征, 根本原因还是太阳辐射在北极地区的季节变化。

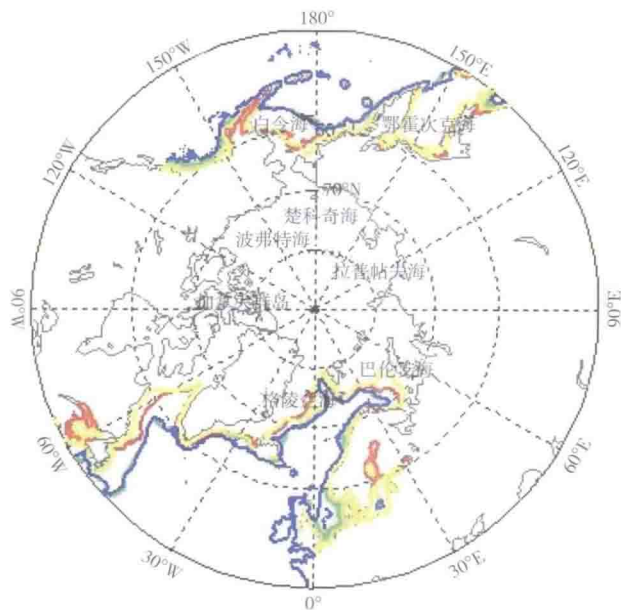


图1-6 北极海冰外缘线1979—2008年各季气候态平均分布
绿线: 春季(3—5月); 红线: 夏季(6—8月); 黄线: 秋季(9—11月); 蓝线: 冬季(12—翌年2月)
(数据源于NSIDC)