



北极快速变化与 海洋生态系统响应

余兴光 主编

Marine Ecosystem Response and
Arctic Rapid Change

北极点



海洋出版社

北极快速变化与海洋生态 系统响应

Marine Ecosystem Response and Arctic
Rapid Change

余兴光 主编

海洋出版社

2016年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

北极快速变化与海洋生态系统响应/余兴光主编. —北京: 海洋出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5027-9638-9

I. ①北… II. ①余… III. ①北极-海冰-科学考察-研究②北极-海洋-生态系-研究
IV. ①P941.62 ②Q178.53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 303535 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 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

开本: 889 mm×1194 mm 1/16 印张: 33.5

字数: 870 千字 定价: 190.00 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

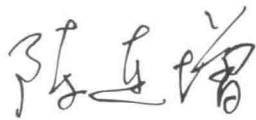
序

近几十年，北极快速变化引起各方关注，其变化导致的一系列大气、海洋、陆地、冰雪和生物等多圈层相互作用过程，不仅对包括我国在内的中高纬度国家的气候产生显著影响，而且对北极生态系统、碳汇效应、航道资源、海洋资源和渔业资源开发利用等产生了深刻影响。研究表明，全球变暖、北极海冰快速融化、海水酸化以及人类活动的影响正在改变着极地海洋环境，而环境变化势必会影响依赖其生存的海洋生物群落，造成的一系列生态后果可能会蔓延至海洋生物的各个营养级。

围绕北极变化及其可能带来的生态系统响应，中国第四次北极科学考察于2010年7—9月开展了以“北极海冰快速变化机制和北极海洋生态系统对海冰快速变化的响应”为主题的综合性考察。考察活动不仅顺利完成所有预定考察任务，还实现了我国依靠自己的力量到达北极点开展科学考察的愿望。此次考察范围之广、内容之全，取得的资料和样品之多、纬度之高，均超过了我国前三次北极考察，为国际极地年中国行动计划画上了一个圆满的句号。

通过本次考察和随后的深入研究，我国科学家对北极的认识进一步加深，并得到了一些新的认识。研究表明，加拿大海盆中层水核心深度变化源于中层水密度变化和海冰减退所导致的表面应力涡度增强，这种变化是北极气候变化的一个重要信号；由于大尺度的气旋活动以及较强的夏季北极偶极子，导致2010年出现了北极海冰穿极融化的现象；而随着北极海冰的快速变化，北冰洋及其邻近海区的营养盐分布、生物泵组成结构、温室气体、碳循环等过程也在发生着重大的变化；在气候变化和各种驱动力作用下，北极生物种类组成和分布及其群落结构等产生了明显的响应，包括部分种类出现小型化、分布范围北移现象等。此外，通过对古海洋与古气候变化研究，指示了北极海域过去与近代的环境变化的联系。而海冰对甲烷的吸收/排放状态具有很大的空间差异。这一系列的研究成果已经在国际学术期刊中发表，大大丰富了人类对北极海洋科学方面的认识。

本专著汇集了各个专业依托第四次北极科学考察的研究成果，使我们对“北极快速变化与海洋生态系统响应”有了更多更新的认识，同时也提高了我国对北极科学研究的水平，拓展了国际影响。期望本专著的出版，能够为今后开展北极考察和研究提供借鉴；也希望未来我国的北极研究能够取得更大的进展，为世界科学发展和人类和平利用北极做出新的贡献。



2015年12月11日

前 言

中国第四次北极科学考察是我国在国际极地年 (IPY) 期间组织实施的两个北极科学考察航次的第二个航次, 是中国 IPY 计划的重要组成部分。考察和研究以北极海冰快速变化与海洋生态系统响应研究为主题, 确定两大科学目标: ①北极海冰快速变化机制。即以北极海冰快速变化机理研究为核心, 开展与海冰大范围融化相关联的大气、海冰和海洋过程观测, 研究海冰大范围融化的机理, 为预测海冰变化趋势提供依据; ②北极海洋生态系统对海冰快速变化的响应。即以全球气候变化和北极海冰快速变化为背景, 以生态系统响应为目标, 开展生态系统多学科综合考察, 研究与海冰变化密切相关的海洋生态系统结构和功能变化, 阐明北极海洋生态系统调控机制, 为进一步预测北极生态系统变化趋势提供科学依据。为完成上述目标, 我国第四次北极科学考察的主要内容有 4 项: ①北极海冰快速变化过程及其机理研究; ②北极碳通量及生源要素的生物地球化学循环研究; ③北极海洋与海冰基础生产力研究; ④北极海洋生物群落和古生态环境变化研究。

此次考察自 2010 年 7 月 1 日开始, 9 月 20 日返回到上海中国极地研究中心码头, 历时 82 d, 总行程 12 600 n mile。来自国家海洋局、教育部、中国科学院、中国气象局以及中国中央电视台、新华社等媒体的 116 位, 其中包括考察队员和来自美国、法国、芬兰、爱沙尼亚等国的 5 位科学家, 共计 121 人参加了本次考察。共完成了 135 个站位的海洋学调查、1 个长期冰站的海冰气综合观测和 8 个短期冰站的观测、1 个北极点站位观测, 超过了原计划设置的考察站位及范围, 获得了一系列突破性成果。一是实现了北极科学考察队依靠自己的力量到达北极点开展科学考察的愿望; 考察站位区域南北纵贯 2 300 n mile, 东西横跨 1 100 n mile, 范围之广、内容之全, 取得的资料和样品之多、纬度之高均是我国北极考察史上不曾有过的。二是考察取得了一系列新进展, 首次在白令海海盆 3 742 m 水深完成 24 h 连续站海洋学观测; 首次将海洋考察站延伸到北冰洋高纬度的深海平原, 在阿尔法海脊、马卡洛夫海盆, 获取了海洋水文、海洋地球化学、海洋大气科学、海洋生物、海洋地质等方面的资料和样品, 填补了该区域资料的空白。三是海洋生态系统考察首次在 88°26'N、3 000 m 水深垂直分层生物采样, 成功采集到我国迄今在地球最北区域 87°21'N 一条体长 18 cm 的北鳕鱼类生物样品; 首次在 88°24'N 高纬地区获得水深 3 997 m 的沉积物柱状样, 最长柱状样 4.4 m。四是首次在北极点上布放了冰浮标, 发射了抛弃式温盐深剖面探测仪, 进行了生态学观测, 采集了大量海冰和海冰样品, 并获得 2.3 m 长的北极点冰芯。五是顺利回收了 2008 年布放的综合观测潜标系统 (线长超过 1 300 m、观测周期超过 1 年以上的极地深水、长期潜标)。六是“雪龙”船到达 88°26'N, 开创了中国航海史北冰洋最北的新纪录。

本专著以中国第四次北极科学考察获得的第一手资料为基础, 将现场数据和历史资



料相结合, 大面调查和重点断面数据深入分析相结合, 多参数、多学科的资料分析与研究相结合, 开展了北极海洋环境快速变化分析和生态系统响应的相关研究, 获得了一系列研究成果和新的认识。研究结果表明, 加拿大海盆中层水核心深度在 2003—2011 年间发生了明显变化, 其变化源于中层水密度变化和海冰减退所导致的表面应力涡度增强, 这种变化是北极气候变化的一个重要信号。海冰观测结果表明, 由于大尺度的气旋活动以及较强的夏季北极偶极子, 导致 2010 年夏季北冰洋太平洋扇区从楚克奇一波弗特海沿岸至北极中心区域都出现较大范围的低海冰密集度区域, 出现了穿极融化的现象。包括北极点附近在内, 整个浮冰区近地层始终存在逆温层和逆湿层, 边界层高度与逆温强度呈显著的对数关系, 在北极点附近海区的边界层高度较低, 而逆温强度较强, 显示了很强的冰/气相互作用。而随着北极海冰的快速变化, 北冰洋及其邻近海区的营养盐分布、生物泵组成结构、温室气体、碳循环等过程也在发生着重大的变化。理化环境变化对各生物类群的种类组成和丰富水平产生影响, 特别是海冰融化的影响尤为显著, 由此也产生了部分种类的生物学特征和生态学习性的变化。从总体上看, 物种小型化、分布范围北移正成为其主要响应方式。此外, 通过白令海和西北冰洋西部悬浮体特征、表层沉积物特征, 以及白令海和北冰洋古海洋与古气候变化等内容研究, 不仅指示了北极海域过去与近代的环境变化, 也对北极在全球变化中的作用有了更加深入的了解。海冰覆盖区的甲烷通量可能是由于其下覆海水中甲烷沿着海冰的细小孔隙上升所致, 也有可能是海冰中微生物活动的结果, 抑或是这二者综合作用的结果, 而海冰对甲烷的吸收/排放状态具有很大的空间差异, 研究表明, 底层水由于受到沉积物释放或甲烷水合物的影响, 其甲烷含量高于表层水。

由于北极快速变化及其在全球变化中反馈显著, 北极问题将越来越受到环北极国家和其他国家的高度关注。这对于我们参与北极科学研究的工作者来说, 知识需求和挑战也将越来越大, 但是, 无论考察途中前方冰天雪地, 考察过程劳苦艰辛、困难重重, 我国北极海洋科学考察仍然排除万难, 历尽千辛万苦, 努力揭示隐藏于北极神秘面纱后面各种系统变化的过程、联系、驱动要素和因果关系。而本专著也正是基于这些考察结果特别是第四次北极科学考察所获研究成果的体现, 由此可见, 北极在全球变化的大背景下, 海冰快速变化已经引起了物理过程和生物—化学—地质过程变化, 并产生气候和环境效应。

本书共分 10 章, 由余兴光、林龙山和卞林根编审。第 1 章“北极海冰快速变化及其生态系统响应”由余兴光、林龙山、唐森铭、吴军、吴日升撰写并统稿。第 2 章“北极海洋水团变化及冰—海相互作用过程”由史久新统稿, 参加撰写的人员有: 史久新、钟文理、赵进平、陈敏、潘红、童金炉、王维波、舒启、刘国昕、郭桂军。第 3 章“北极海冰快速变化及其机制研究”由雷瑞波统稿, 参加撰写的人员有: 雷瑞波、赵进平、李涛。第 4 章“北冰洋中心区辐射平衡和大气边界层观测研究”由卞林根撰写并统稿。第 5 章“北极地区碳循环和海洋酸化研究”由高众勇统稿, 参加撰写的人员有: 高众勇、李宏亮、庄燕培、陈敏、门武、詹力扬。第 6 章“北极海洋上层浮游生态系统及变化”由何剑锋统稿, 参加撰写的人员有: 何剑锋、康建华、张芳、林凌、王雨、张光涛、徐志强。第 7 章“北极海洋底层生物生态系统的变化”由林龙山和林和山统稿, 参加撰写的

人员有：林龙山、林和山、林荣澄、王建佳、王建军、宋普庆、李渊、张然。第8章“北极沉积特征与古气候环境演化”由汪卫国统稿，参加撰写的人员有：汪卫国、刘焱光、王汝建。第9章“北极大气温室气体和污染物的分布特征”由谢周清、卞林根、康辉撰写并统稿。第10章“北极航线气象保障”由黄勇撰写并统稿。

第四次北极科学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，特别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！

本书在编写过程中难免存在错误，敬请读者批评和指正。

余兴光

2015年12月20日

Introduction

The 4th Chinese National Arctic Research Expedition is the second cruise of two arctic research expeditions organized and implemented by China in the International Polar Year (IPY) and it is also an important component of China's IPY plan. With the theme, the study on marine ecosystem responding to the rapid change of arctic sea ice, the research and expedition have two scientific goals: (1) Rapid change mechanism of the arctic sea ice. Namely, focus on the research on rapid change mechanism of arctic sea ice while conducting the observations of atmosphere, sea ice and oceanographic processes related to meltdown mechanism of large scale of sea ice for the sea ice forecasting in the future; (2) Response of arctic marine ecosystem to the rapid change of sea ice. Namely, conducting comprehensive multidisciplinary surveys in the Arctic sea and studying the structure and functional changes in marine ecosystem coupled with sea ice variations in order to illuminate the mechanism controlling the arctic marine ecosystem for scientifically forecasting and managing the arctic ecosystem. To achieve the goals, the projects of 4th Chinese National Arctic Research Expedition mainly covers 4 aspects: a. the process and mechanism of rapid arctic sea ice change; b. biogeochemical cycle on the arctic carbon flux and biogenic elements; c. primary productivity in arctic sea and sea ice; d. changes of arctic marine communities and paleoecological environments.

The expedition lasted 82 days from July 01, 2010 to September 20, 2010 and the voyage covers 12 600 miles and ended fruitfully at the pier of Chinese Polar Research Center. Altogether, 121 participants jointed in the expedition, among them 115 from the State Oceanic Administration (SOA), Ministry of Education, Chinese Academy of Sciences, China Meteorological Administration, China Central Television, Xinhua News Agency and media from local government, 5 scientists from countries of the United States, France, Finland and Estonia, and 1 scientist from the Biodiversity Research Center, Academia Sinaica, Taipei. The survey has completed oceanographic observations at 135 stations, conducted a comprehensive sea ice air observation at 1 long-term ice station and 8 short-term ice stations, besides 1 station in the North Pole. The expedition had finished the observations at both stations and areas more than it was planned and have made a series of breakthrough in the history of Chinese arctic expedition. At First, the expedition fulfilled the investigation in the North Pole without the help of other country in cruise of 2 300 miles latitudinally and of 1 100 miles longitudinally. The areas and the scientific fields studied, and the data and samples obtained are all far exceeded what it had performed in the history of China arctic expedition. Secondary, a series of progresses and developments has made in the expedition. For example, it is the first time we finished a 24 h oceanographic observation at a 3 742 m depth station in the Bering Sea basin. Again, it is the first time we extended the observations in abyssal plain in the high latitude Arctic Ocean, where data and samples from Alpha Ridge and Makarov Basin were obtained including the fields of marine hydrology, marine geo-



chemistry, marine atmosphere sciences, marine biology, marine geology and etc. and thus filling the data gaps in these areas. Thirdly, a vertical and stratified sampling has successfully conducted in marine ecosystem of 3 000 m depth near latitude $88^{\circ}26' N$, where a specimen of Polar cod (*Boreogadus saida*), in length 18 cm, has ever been collected so far in $87^{\circ}21' N$ and where a longest sediment core in length 4.4 m at the depth of 3 997 m in $88^{\circ}24' N$ were obtained. Fourthly, an ice buoy was developed and a XCTD was launched for the first time at the North Pole, along with ecology observations and a large number of sea ice sample collected, including a 2.3 m ice core. Fifthly, it had recovered successfully a long term submersible marine mooring system for integrated observations that deployed in 2008. The system had more than 1 300 m water depth and 1 year records of data from the deep polar sea. The last, the arrival of "Snow Dragon" breaker in $88^{\circ}26' N$ has created a new record in the history of Chinese marine navigation in the northernmost Arctic Ocean.

Based on the first-hand data obtained during the 4th Chinese National Arctic Research Expedition and the literature data, combined with the data from general survey, key profiles and multi-parameters in the multi-disciplinary studies, the responds of marine ecosystem to rapid environmental changes in the Arctic were studied and resulted in a series of achievements and knowledge. The results shows that the mid-water depth in the Canada Basin had changed significantly from 2003 to 2011 due to the strengthened vorticity of surface stress stemmed from mid-water density fluctuation and sea ice loss, and thus it is an important signal of climate change in the Arctic. The results from the sea ice observations show that low sea ice concentration area and the phenomenon of crossing pole melting appeared in areas from Chukchi - Beaufort coast in the Pacific Arctic to the Arctic Center in summer 2010 were due to large-scale of cyclone activity and strong summer arctic dipole. Secondly, there are always thermal inversion layer and humidity inversion layer exits in the surface layer of entire sea-ice field, even in vicinity of the North Pole. The height of boundary layer is logarithmically related to thermal inversion strength and in the vicinity of North Pole the layer is low but with strong thermal inversion, exhibiting a very strong ice-air interactions. It was found that simultaneously nutrient distributions, biological pump structure, greenhouse gases, carbon cycling and other processes are also undergoing dramatically changes with rapid change arctic sea ice.

Physicochemical environment change, in particular sea ice melting, influences the abundance and species composition of biological taxa, hereby, changes biological characteristics and ecological habitats of certain species. On the whole, species miniaturization and northward extending of habitats become evident as a respond mode. Moreover, the studies on the suspension particles and overlying deposits in the Bering Sea and the Western Arctic and the changes of paleo-oceanography and paleo-climate from the Bering Sea to the Arctic Ocean not only indicates environmental change of the Arctic sea area in the past and modern times, but also bring in profound knowledge of the role of Arctic in global changes. Methane flux in sea ice covered area may result from the rise of methane in seawater along the tiny pore of sea ice or from microbial activities in the sea ice or possibly the combinations of both. It is found that sea ice is of great spatial differential for methane absorption/emission. The bottom water contains more methane than surface water due to the effects of sediment release or methane hydrates.

Due to rapid change of the Arctic and the significant feedback in global change, arctic issues are drawing much attention from countries in the world and around the Arctic. We, the workers who engages in arctic scientific expedition, are facing with greater demands and challenges of knowledge. However, regardless the hardships in the world of ice and snow during the expedition, Chinese Arctic Expedition should overcome all obstacles in revealing various processes, driving forces and causal relationships covered by the mysterious veil of Arctic. Embodied the expedition results, particularly the results of the 4th arctic expedition, this monograph reveals that the rapid change of arctic sea ice in the Arctic has given rise the change of physical and biogeochemical processes and produced climatic and environmental effects following the global change.

The editors of this book are Yu Xingguang, Lin Longshan and Bian Lingen. The book is composes 10 Chapters. Chapter 1, Rapid Change of Arctic Sea Ice and Ecosystem Response, is written and compiled by Yu Xingguang, Lin Longshan, Tang Senming, Wu Jun and Wu Risheng. Chapter 2, Change of Arctic Water Masses and the Ice – Sea Interaction Process, is compiled by Shi Jiuxin with participant writers of Shi Jiuxin, Zhong Wenli, Zhao Jinping, Chen Min, Pan Hong, Tong Jinlu, Wang Weibo, Shu Qi, Liu Guoxin and Guo Guijun. Chapter 3, Mechanism and Physical Characterization of the Rapid Change of Arctic Sea Ice, is compiled by Lei Ruibo with participant writers of Lei Ruibo, Zhao Jinping and Li Tao. Chapter 4, Atmospheric Boundary Layer of the Arctic is written and compiled by Bian Lingen. Chapter 5, Research on the Arctic Greenhouse Gases, Nutrient Carbon Cycling and Ocean Acidification, is compiled by Gao Zhongyong with participant writers of Gao Zhongyong, Li Hongliang, Zhuang Yanpei, Chen Min, Men Wu and Zhan Liyang. Chapter 6, Response of the Arctic Upper Ocean Ecosystem to Climate Change, is compiled by He Jianfeng with participant writers of He Jianfeng, Kang Jianhua, Zhang Fang, Lin Ling, Wang Yu, Zhang Guangtao and Xu Zhiqiang. Chapter 7, Change of the Arctic Bottom Ocean Biotic Ecosystem, is compiled by Lin Longshan and Lin Heshan with participant writers of Lin Longshan, Lin Heshan, Lin Rongcheng, Wang Jianjia, Wang Jianjun, Song Puqing, Li Yuan and Zhang Ran. Chapter 8, Sedimentary Characteristics and Paleoclimate & Paleoenvironment Evolution of the Arctic, is compiled by Wang Weiguo with participant writers of Wang Weiguo, Liu Yanguang and Wang Rujian. Chapter 9, Distribution Characteristics of Greenhouse Gases in the Atmosphere and Pollutants in the Arctic, is written and compiled by Xie Zhouqing, Bian Lingen and Kang Hui. Chapter 10, Meteorological Support of the Arctic Air, is written and compiled by Huang Yongyong.

Quite a lot of achievements in the 4th Arctic research expedition are obtained under the leadership and attention of the State Oceanic Administration (SOA) as well as the joint efforts of all participants and the crew of “Snow Dragon”. Sincere thanks to the crew of “Snow Dragon”, experts and leaders who guides this expedition on the occasion of publication.

It should have faults during the compilation of this book and any criticism and correction are welcome from the readers of you.

YU Xingguang

20, Dec. 2015

目 录

第 1 章 北极海冰快速变化及其生态系统响应	(1)
1.1 北极科学研究目标	(3)
1.2 研究热点和策略	(4)
1.3 我国的北极考察	(10)
1.4 总结	(12)
参考文献	(12)
第 2 章 北极海洋水团变化及冰—海相互作用过程	(15)
2.1 加拿大海盆大西洋水的加深现象	(17)
2.2 西北冰洋河水和海冰融化水的时空变化	(30)
2.3 北极海洋下行辐射衰减系数的变化	(38)
2.4 北极点附近海冰的漂移与模拟	(48)
2.5 北极冰下海洋埃克曼漂流的结构特征	(56)
2.6 夏季北极冰下海洋热通量的时间变化	(65)
2.7 总结	(74)
参考文献	(75)
第 3 章 北极海冰快速变化及其机制研究	(87)
3.1 海冰和积雪的物理结构	(89)
3.2 海冰形态特征的空间变化	(98)
3.3 海冰输出区海冰运动特征	(103)
3.4 积雪和海冰的光学特征	(113)
3.5 总结	(121)
参考文献	(122)
第 4 章 北冰洋中心区辐射平衡和大气边界层观测研究	(127)
4.1 冰站观测概况	(129)
4.2 北冰洋夏季辐射参数	(130)
4.3 北冰洋夏季湍流参数	(134)
4.4 北冰洋大气的垂直结构	(136)
4.5 总结	(142)
参考文献	(143)
第 5 章 北极地区碳循环和海洋酸化研究	(145)
5.1 营养盐及生物泵结构对快速融冰的响应	(147)

5.2	生源要素的生物地球化学	(157)
5.3	河流及融冰淡水的化学示踪研究	(173)
5.4	海水碳酸盐体系及海—气界面 CO_2 通量	(178)
5.5	海冰变化与有机碳输出通量研究	(185)
5.6	北冰洋 CH_4 、 N_2O 等温室气体的海—气通量	(194)
5.7	北冰洋海洋酸化研究	(197)
5.8	总结	(202)
	参考文献	(204)
第6章	北极海洋上层浮游生态系统及变化	(215)
6.1	浮游植物生物量和初级生产力	(217)
6.2	微微型浮游生物群落	(225)
6.3	浮游植物群落	(237)
6.4	浮游动物群落	(248)
6.5	海冰生物群落及其变化	(258)
6.6	冰表融池生物群落结构及生物多样性	(266)
6.7	总结	(271)
	参考文献	(272)
第7章	北极海洋底层生物生态系统的变化	(279)
7.1	小型底栖动物空间分布	(282)
7.2	大型底栖动物空间分布及变化	(291)
7.3	北极鱼类物种多样性及其对环境变化的响应	(308)
7.4	总结	(315)
	参考文献	(316)
	附录 7-1 白令海和楚科奇海鱼类种类组成	(323)
	附录 7-2 各种类适温性、栖息环境、经济价值、洄游性和分布区域	(325)
	附录 7-3 对生态环境变化产生响应的种类及其变化情况	(327)
第8章	北极沉积特征与古气候环境演化	(329)
8.1	悬浮体特征	(331)
8.2	表层沉积物特征及其环境意义	(349)
8.3	过去古海洋、古气候环境变化研究	(426)
8.4	总结	(436)
	参考文献	(440)
第9章	北极大气温室气体和污染物的分布特征	(459)
9.1	观测航线	(461)
9.2	大气汞的分布特征	(462)
9.3	北冰洋生物气溶胶	(466)
9.4	甲烷通量的分布特征	(471)
9.5	大气臭氧和紫外辐射的分布特征	(475)

9.6 黑碳气溶胶的分布特征	(477)
9.7 气溶胶散射系数	(483)
9.8 总结	(485)
参考文献	(486)
第 10 章 北极航线气象保障	(493)
10.1 北极航线气象观测仪器介绍	(495)
10.2 北极航线气象状况	(499)
10.3 北冰洋海冰监测与分析	(503)
10.4 总结	(517)

第1章 北极海冰快速变化及其生态系统响应

随着冷战结束，北极地区考察和科研活动日益增多，各国均为自身寻找扩大北极权益的证据。2008年俄罗斯北极海底插旗，再次激发了环北极国家对北极大陆架的争夺。英国、法国、德国和西班牙等欧洲国家，基于北极的传统利益，也在通过加大北极考察，增强自身在北极的实质性存在。与此同时，亚洲国家的日本、韩国、印度也相继在北极斯瓦尔巴群岛设立了科学考察站，积极投入到北极考察队伍行列；日本自20世纪90年代以来，从不间断地开展北极航线和北极海洋科学考察。2008年，美国、俄罗斯、加拿大、挪威和丹麦5个环北极国家发表了《伊卢利萨特》宣言（THE ILULISSAT DECLARATION），明确将依照《联合国海洋法公约》的框架解决北极海洋和大陆架争端，这也为非北极国家介入北极事务提供了机会。

2007—2008 国际极地年 (IPY) 是全球科学家共同策划、联合开展的大规模极地科学考察活动, 各国都以此为契机, 加大对北极地区的考察, 同时组织广泛的宣传活动, 极力扩大各自的极地权益、增强国民的极地意识。恰逢此前北极海冰处于快速减退时期, 融冰起始时间异常、陆地淡水输入增加、海水盐度降低、高密度水输出减少、海水增温、气压下降、极地涡旋加强等现象, 这些现象不可避免对地球系统产生影响, 并在全球气候变化中发挥重要的作用 (余兴光, 2011)。

本章节第一部分首先介绍了中国第四次北极科学考察作为国际极地年行动计划的最后一次重要考察活动的科学研究目标; 其次讲述了大气环流、对流通量、海冰和地质年代的研究进展, 以及北极生态系统响应的研究特点和策略; 最后, 针对截至中国第四次北极科学考察之前的各航次考察情况, 详细介绍了所有航次的考察特点和取得的主要成果。

1.1 北极科学研究目标

随着全球气候变暖趋势加剧, 北极的科学问题更加突出, Aagaard 等 (1999) 从北极科学研究的战略角度, 提出了亟需探讨和回答的问题: ①北极在全球气候变化中发挥重要作用, 但它在调控全球海洋环流以及在水循环中的作用仍未清楚; ②过去的 10 多年中北冰洋发生了重大的变化, 但这种变化的性质和长期性需进一步认知, 我们面对如何取得预测北极长期变化能力的挑战; ③北冰洋的地质记录是全球地质研究的空白, 今天我们还不能够建立北冰洋的板块结构和古气候模型, 限制了北冰洋大陆架下资源的开发; ④北冰洋的生物地球化学循环很大程度上可能与全球生物和大气相关元素的循环关系密切, 北冰洋陆架碳、氮、硅和其他物质在全球生物地球化学循环中的具体作用以及北极环境变化影响全球生物地球化学循环的过程需要进一步探知; ⑤北极生态系统的健康状态如何, 除了极端气候赋予生态系统脆弱性外, 当前北冰洋的生产力和高营养阶的生产力的变化、北冰洋有机污染物污染的程度以及增强的紫外辐射对北极生态系统健康的威胁仍需加强认识。特别地, 北冰洋亚洲陆架上低盐影响海区的能量流动和物质循环、白令海和楚科奇海对进入中部北冰洋的颗粒物生物的生产 and 消费过程及影响已经成为亟需填补的知识断层。

鉴于面临全球气候快速变化以及北极冰雪覆盖面积大大减少的严重局面, 2013 年美国北极研究政策委员会 (IARPC) 提出北极区域科学研究的 5 年计划 (DOD, 2013), 建议 2013—2017 年各研究机构开展 7 个领域的研究, 其中, 除了加强陆地生态系统的研究外, 其他 6 个领域分别为海冰与海洋生态系统、大气表层热、能量和质量平衡、观测系统、区域气候模式、可持续社区的适应方法与人类健康。IARPC 的计划, 再次强调了海冰与生态系统研究的重要性, 同时对驱动海冰变化的大气能量传递方式给予很大的关注。此外, 将观测技术方法、区域气候变化和人类健康放在了重要的位置。

2007 年第四次国际极地年 (IPY) 活动正式展开, IPY 的科学目标强调了对极区的持续观测、国际合作、数据开放、与过去和未来状态的对比、跨领域和学科、培养研究队伍、发展新技术和后勤保障, 以及提高公众和决策者的知识等。IPY 确定了 6 个科学研究主题: 量化极区环境时空变化现状; 了解人类活动对极地过去和现在的影响, 提高对未来变化的预报能力; 研究极地与全球过程在各种尺度上的联系, 了解极区与全球的相互作用; 研究汲取前



沿科学问题；研究地球内核和地球空间；研究文化、历史和社会过程的形成及其对全球文化的贡献。极地科学调查研究需要大规模的合作，多学科的合作。极地研究大规模国际合作的科学时代已经到来。

北极科学问题关乎当代和将来数代人类的居住环境、生活方式，将来气候变化的方向是我们国家政策取向的基点。从这一观点看，当前北极考察目标宏大、任务艰巨。可喜的是我们的北极科学考察已经朝向这些目标做了不懈的努力，获得了丰硕的成果，为后续工作做了积极的准备。

1.2 研究热点和策略

过去1亿3千万年以来，北冰洋一直是地球的一员，它过去和现在还继续影响着当今的地球及其地球上的生命。北冰洋与全球气候，与地球巨大的生物地球化学循环有着密切的关系。从今天北极的变化预测北极的明天，今天的北极可能与过去的北极会很不一样，充分了解北极的过去、现在及其塑造它的过程，是预测这一独特区域，包括区域社会、经济、健康以及未来发展的关键所在。

北极正在经历着十年和百年际的气候变化。最近几十年北极地区的气候变化特别显著，发生了称之为尤娜迷（Unaami）的近400年来最快速的变化，引起全球科学家的关注。20世纪90年代中后期，广袤罕有人迹的北冰洋及周边区域的冰盖和海上冰山开始溶解，北极冰层的厚度减少了20%~40%，夏季北极海冰和陆冰的面积逐年缩小。受冰盖季节性变化影响，北极海洋对气候变化响应迅速，区域光照、温度和生产力的季节变化强烈。大多数模型预测，到2100年夏季北冰洋的海冰将全面融化。北极气候进入快变、易变的敏感年代，北冰洋环境和生态系统酝酿着新的格局变化。这些变化不仅影响全球气候变化模式，同时也影响北极生态系统和当地居民的生活环境。北极气候变化导致的海平面上升，为全球所关注。了解北极气候变化的过去、现在，全面了解驱动北极物理变化的要素，对于预测北极以及全球将来的气候变化的必要工作，因此是北极科学研究的重点。了解北极的大气和海洋环流与北极海冰变化，北极地质记录以及北极生态系统的响应是北极科学调查和研究的关键。

1.2.1 北极环境快速变化

1.2.1.1 大气环流

北极的大气驱动力通过风和海气交换强烈地影响着海洋生态系统。风的影响通常在小尺度规模上扰动海洋上层水体，从而影响营养盐的垂直通量，初级生产力和浮游动物、鱼类、海鸟和海洋哺乳动物摄食的成功率。风直接驱动海洋表面产生平面流，同时作用于海平面波动，进而影响整个水柱。海流携带着浮游动物和仔稚鱼在区域内外流动，从而浮游生物获得高存活率和再补充的机会。风还驱动上升流，补充营养盐，提高生产力；影响冰的形成、破裂以及冰的持久性。大气热交换决定海洋上表层的温度，产生对流，影响冰的形成或融化的速率（ASSAS）。我国学者在北冰洋中心区发现了中低纬度罕见的热传输现象，穿极气旋和急流从高空大气向冰面输送热量，冰面增温，导致海冰破裂，海冰硬度的脆变，海冰厚度增长