

渤海海冰储量测算与品质评价

顾 卫 史培军 陈伟斌 著
谢 峰 许映军 袁 帅



科学出版社

渤海海冰储量测算与品质评价

顾 卫 史培军 陈伟斌 著
谢 峰 许映军 袁 帅

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是在完成国家自然科学基金委员会重点基金项目“渤海海冰作为淡水资源的储量测算”(40335048)和科技部国家科技支撑重大项目课题“渤海海冰资源开发利用关键技术及试验研究”(2006BAB03A03)部分工作基础上撰写而成的。本书采用遥感和地理信息系统技术,结合海上和沿岸海冰调查以及海冰冻结实验等数据,提出了海冰面积和厚度的信息提取方法,完成了渤海海冰资源储量的测算,分析了海冰储量的时空分布规律,指出了海冰作为淡水来源的品质特点,探讨了海冰开采对沿岸气候和海水盐度的可能影响,评价了渤海不同海区海冰资源开发的适宜性。

本书是海冰资源开发利用的理论基础,可作为物理海洋、海冰工程、海冰灾害等领域专业人员的参考书,也可作为海洋科学与工程、资源科学与工程等专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

渤海海冰储量测算与品质评价 / 顾卫等著. —北京:科学出版社,2014.9

ISBN 978-7-03-041914-9

I. ①渤… II. ①顾… III. ①渤海-海冰-储量-测算 ②渤海-海冰-品质-评价 IV. ①P731.15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 217920 号

责任编辑:彭胜潮 景艳霞 / 责任校对:韩 杨

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年9月第一次印刷 印张:19 1/2 插页:14

字数:450 000

定价:139.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

渤海古称“沧海”，又因地处北方，也称为“北海”，其地理位置为 $37^{\circ}07' \sim 41^{\circ}0'N$ ， $117^{\circ}35' \sim 122^{\circ}15'E$ 。

渤海是我国的内海，它三面环陆，北、西、南面分别与辽宁省、河北省、天津市和山东省三省一市（直辖市）毗邻，东面通过渤海海峡与黄海相通，辽东湾、渤海湾、莱州湾三大海湾构成了渤海的主体，辽东半岛和山东半岛犹如伸出的双臂将其合抱，构成首都北京的海上门户。

渤海的面积约为 8.27 万 km^2 ，平均水深 18 m ，沿岸水浅处只有几米，东部老铁山水道水深处达 86 m 。渤海海峡口宽 59 n mile ，渤海水总容量约 $1\,730 \text{ km}^3$ 。

渤海是我国北方的海上交通要道，它拥有 40 多个港口，构成了中国最为密集的港口群。渤海拥有辽河油田、冀东油田、大港油田和胜利油田，是我国重要的油气资源基地。另外，渤海盛产对虾、蟹和黄花鱼，海洋资源和旅游资源极其丰富。正在建设中的天津滨海新区和河北渤海新区，将成为我国北方最大的经济开发区。

渤海沿岸是以京津冀为核心、以辽东半岛和山东半岛为两翼的环渤海经济区。环渤海经济区包括北京、天津、河北、山东、辽宁三省两市（直辖市），面积 51.8 万 km^2 ，占全国陆地面积的 5.4% ；人口 2.3 亿，占全国总人口的 17.5% ；地区生产总值达到 3.8 万亿元，占全国生产总值的 28.2% ；该经济区是我国北方重要的经济地带，也是东北亚经济圈的中心地区。

然而这样一个具有重要政治意义、经济意义、战略意义的地区，长期以来却受到淡水资源短缺的困扰。虽然辽河、滦河、海河、黄河等水系在这里入海，但由于气候干旱、水量减少、需量过高、污染严重等原因，只能是“守着河流无水用，望着渤海用水难”。环渤海地区水资源总量占全国的 2% ，地表水资源量占全国的 1.3% ，人均水资源量低于 500 m^3 ，不到全国的 $1/5$ ，属于水资源严重短缺地区；其中大连、天津、北京、青岛等城市人均水资源量甚至低于 180 m^3 ，处于极度缺水状态。水资源短缺已经成为 21 世纪制约环渤海地区社会经济可持续发展的最大瓶颈。

国家为了解决环渤海地区的水资源短缺问题，已先后建设了引滦入津、引黄济津等供水工程，目前正在建设南水北调工程，这对于缓解天津、北京等局部地区的水资源不足起到重要作用，但在总体上并没有扭转环渤海地区的缺水局面；特别是对于辽东半岛、山东半岛来说，还难以直接受益于南水北调等大型调水工程。

寻找和扩大新水源，增加淡水资源总量，是解决我国淡水资源短缺的根本途径，是保障我国社会经济可持续发展具有重大意义的战略措施，也是资源科学工作者肩负的重要历史使命。由于我国北方地区最大的水面是渤海，因此，向渤海要淡水成为新水源开发的主要方向之一。

海水淡化是人类追求了几百年的梦想。早在世界大航海的时代，英国王室就曾悬赏征求经济合算的海水淡化方法。时至今日，海水淡化的方法虽然有数百种之多，但真正

被大量用于工业化生产的是反渗透法(膜法)和蒸馏法(热法)。特别是 20 世纪 50 年代以来,全球水资源危机的加剧促进了海水淡化技术发展。作为一种可靠的工业技术,海水淡化产业已成为新兴产业部门。目前全球已有 120 多个国家 170 多个公司在从事海水淡化产业,全世界已有 1.36 万座海水淡化厂,海水淡化供养的人口已达 1 亿之众。

我国海水淡化技术起步于 1958 年。经过 50 多年的发展,已经形成了比较成熟的多级闪蒸、多效蒸发和反渗透等海水淡化技术,完成了多项工程示范,日产水能力已经达到 70 万 m^3 。但由于能耗、材料、价格等方面的原因,海水淡化技术的推广和应用还不尽如人意。那么,除了海水直接淡化以外,是否还有其他海水淡化方法呢?科研人员把目光从海水转向了海冰。

渤海是地理位置偏北的内陆型海区。在冬季风和寒潮天气的影响下,渤海在冬季会出现海水冻结现象,形成大范围的海冰。由于海水在冻结过程中将大量盐离子排出冰体,因此海冰的盐度大大低于海水。渤海海水的盐度为 28‰~30‰,渤海海冰的盐度只有 4‰~11‰,最低的可达到 3‰,而 3‰的盐度已经接近农业灌溉用水的盐度标准。也就是说,如此低盐度的海冰,如果经过简单的处理,能以较低的成本转变为淡水的话,就有可能成为新的淡水资源,从而为解决北方地区缺水问题提供一个新途径,并为增加我国淡水资源总量作出贡献。

开发海冰作为淡水资源利用的研究设想,最早由北京师范大学史培军教授会同其他单位的专家在 1995 年提出,得到了包括前国务委员、原国家科学技术委员会主任宋健院士等领导和学者的支持与指导。为使这一设想得以实现,北京师范大学首先开展了海水成冰及脱盐机理的室内试验研究。2000 年科学技术部农村与社会发展司首次对海冰资源利用研究予以立项支持,使这方面的研究工作开始被纳入国家研究计划,从室内试验逐步走向实际应用研究。2001 年,科学技术部农村与社会发展司再次对海冰资源利用研究给予支持,决定由北京师范大学、国家海洋局海洋环境保护研究所、国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所共同组织研究队伍,以“渤海海冰作为淡水资源的可行性研究”为题目,对海冰资源量的估算、海冰脱盐机理和脱盐技术、海冰采集和储运方法等问题开展进一步研究,取得了一些初步成果。

海冰资源开发利用的主要问题有 4 个:一是海冰作为淡水资源的量与质的问题;二是海冰脱盐淡化的机理和技术问题;三是海冰开采对周边环境的影响问题;四是工业化生产海冰淡水的工艺流程和质量控制问题。在这 4 个问题中,前 3 个问题为海冰淡化的理论和技术问题,后一个问题为海冰资源产业化开发的工程和经济问题。

国家自然科学基金委员会地球科学部基于海冰资源研究对环渤海地区社会经济可持续发展的战略意义,决定以重点项目的力度来支持海冰资源研究的发展。2004 年国家自然科学基金重点项目“渤海海冰作为淡水资源的储量测算”(项目编号:40335048)正式启动,标志着海冰资源开发利用基础理论研究开始进入新阶段。此后,科学技术部在 2006 年以“十一五”国家科技支撑重大项目课题“渤海海冰资源开发利用关键技术及试验研究”(项目编号:2006BAB03A03),对渤海海冰资源储量和质量研究继续给予了支持。

“渤海海冰储量测算与品质研究”包含以下 10 个方面:

- (1) 渤海与渤海海冰概况;
- (2) 冬季渤海的结冰范围信息提取方法研究;

- (3) 渤海海冰面积的量算方法与海冰面积时间序列;
- (4) 渤海海冰厚度参数光谱信息特征的实验研究;
- (5) 渤海海冰厚度信息提取方法研究;
- (6) 海冰厚度随时间的变化特征;
- (7) 渤海海冰资源储量估算及其时空分布特征分析;
- (8) 渤海海冰开发对周边生态环境的影响;
- (9) 渤海海冰资源品质分析;
- (10) 渤海海冰资源开发区位评价。

上述项目由北京师范大学主持,参加及协作单位包括国家海洋环境监测中心、辽宁省气象局等。经过研究人员近四年的努力,在渤海海冰资源量的估算方法、渤海海冰资源量时空分布特征、海冰开采对沿岸气候和海水盐度的影响、海冰品质特征等方面取得了新的进展。本书以上述两个国家项目的研究成果为基础,是对前一阶段海冰资源化开发利用研究的总结和提炼。

本书由顾卫、史培军、陈伟斌、谢峰、许映军、袁帅等共同撰写,主要作者及其工作单位如下。

北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室:史培军、顾卫、哈斯、李宁、许映军、谢峰、袁帅、国巧真、顾松刚、崔维佳、黄树青、吴之正、刘珍、刘杨、张秋义、宋培国、丛建鸥、乐章燕、李澜涛、刘成玉。

北京师范大学地理学与遥感科学学院:王静爱、张国明。

国家海洋环境监测中心:陈伟斌、赵骞、周传光、张淑芳、徐学仁、孟广琳、王立平、吴有贵。

中国气象局沈阳大气环境研究所:崔锦、周晓姗、陈立强。

海冰资源化利用研究是一项艰苦而又繁重的工作。冬季,在 -20°C 以下严寒里,研究人员或是顶风冒雪在野外开展考察和试验工作,或是在渤海沿岸冰区组织人力、安装设备、采冰进行淡化试验,或是乘船出海穿越冰区调查、观测、取样,不畏冰隙的危险,克服了晕船的困扰,一次又一次地在现场取得宝贵的第一手数据。夏季,在 30°C 以上的高温中,研究人员或是坚守在试验田中观测、采样,分析作物生长状况,或是不畏急剧的温度变化而进入 -10°C 的低温实验室,研究海冰脱盐机理。16年的不懈努力,终于有了初步的回报,海冰资源化利用研究已经完成了实验室机理分析和现场小型试验工作,目前正在开展中间试验,最终将把这项科研成果推向产业化应用。

从资源性的角度研究海冰淡化利用问题,在国际上尚无先例。其原因在于地球上海冰主要出现于极地和高纬度地区,那里人口稀少,经济不发达,淡水资源储量比较丰富,由于不存在水资源短缺问题,也就没有开发海冰作为淡水资源的需要。所以国际上有关海冰的研究主要是围绕海冰与海上生产和海上交通运输的关系、海冰与海洋热力动力过程、海冰与全球气候等问题展开,国内也是如此。

渤海三面为陆地环绕,独特的地理位置使之成为地球上纬度最低的结冰海域。由于同纬度的其他海区均无结冰现象,因此有关渤海海冰资源开发利用的研究将充分体现我国的自然、地理和人文特点。随着环渤海地区淡水资源紧缺问题日益严重,实现将渤海海冰作为淡水资源开发利用的设想,将会使我国在国际水资源和海冰等学科前沿独树一帜。

帜,并居于领先之地,同时成功的海冰淡化水资源利用也将是一项对人类发展具有重要科学价值的创新。

渤海海冰资源化利用研究是一件新生事物,由于它在某种意义上颠覆了传统海洋学的一些概念,加上自身在理论、技术、经济等基础研究方面还有不足,因此它从提出设想开始,就受到一些人的置疑或反对,被认为是不可能或者是无意义的。迄今为止,也并未得到学术界的完全认同。我们承认,渤海海冰资源利用问题仍然处于摸索、研究、试验阶段,专家、学者的意见恰恰是我们亟待解决或正在解决的理论难点和关键技术问题。作为参与海冰资源利用工作的资源科学研究人员,我们感到幸运。渤海海冰资源利用对于保障我国环渤海地区经济安全、全面建设小康社会和实现可持续发展、缓解战略性水资源紧缺局面具有战略意义。因此在决定是否应该开展海冰利用可行性研究的关键时刻,科学技术部和国家自然科学基金委员会果断地决策给予支持;在讨论是否需要继续深入开展海冰淡化技术集成示范研究的重要时刻,教育部和国家海洋局也坚定地给予支持。另外,还因为我们的想法赶上了学有所用的新时代,这就是建设资源节约型、环境友好型社会的时代,这就是建设以人为本、和谐社会的时代。我们相信,有社会发展的需要,有政府部门的支持,有专家学者的批评指导,海冰资源化利用研究不仅能够走到今天,而且一定能够走向产业化,成为造福于社会的新型水资源。

感谢全国人大、科学技术部、国家自然科学基金委员会、教育部、国家海洋局对渤海海冰资源化利用项目的支持和资助!感谢北京师范大学、国家海洋环境监测中心等单位对项目研究人员的鼓励和支持!感谢所有关心、支持、批评和指导海冰项目的人!

本书在撰写过程中,引用和参考了前人和有关学者的研究成果,在此一并致谢!

由于时间和水平所限,书中疏漏之处在所难免,期待着同行学者的批评与赐教!期待着与读者讨论交流!

任何可能都是产生于不可能之中。把海冰灾害化为海冰资源,造福中国,造福人类!

目 录

前言

第1章 渤海与渤海海冰概况	(1)
1.1 渤海概况	(1)
1.2 渤海冬季的气候特点	(2)
1.3 渤海海冰的形成与发展	(2)
1.3.1 渤海海冰形成的因素	(2)
1.3.2 渤海海冰的发展过程	(4)
1.4 渤海冰情特征	(6)
1.4.1 渤海冰情的空间特征	(6)
1.4.2 渤海冰情的时间特征	(8)
1.4.3 2009~2010 年冬季渤海冰情	(9)
1.5 海冰监测	(19)
1.5.1 传统的海冰监测方法	(19)
1.5.2 卫星遥感监测技术	(20)
1.6 本章小结	(22)
参考文献	(22)
第2章 渤海结冰范围信息提取	(24)
2.1 低空间分辨率影像中渤海结冰范围的信息提取	(24)
2.1.1 海陆分离处理	(24)
2.1.2 常规结冰范围信息提取方法的结果分析	(25)
2.1.3 影像分析	(29)
2.1.4 基于分区阈值法的结冰范围信息提取	(29)
2.1.5 基于局地对比度的低空间分辨率影像结冰范围信息的提取	(30)
2.2 低空间分辨率影像中伪海冰像元的剔除	(46)
2.2.1 伪海冰像元的存在及其影响	(46)
2.2.2 “伪海冰像元”剔除算法的原理	(49)
2.2.3 剔除算法的实施步骤	(54)
2.2.4 剔除方法的分析	(56)
2.3 低空间分辨率影像中冰水混合像元的线性分解	(57)
2.3.1 冰水混合像元的存在及其影响	(57)
2.3.2 混合像元分解模型	(58)
2.3.3 冰水混合像元分解模型的实现	(60)
2.4 本章小结	(65)

参考文献	(65)
第3章 渤海海冰面积量算与海冰面积动态	(67)
3.1 渤海海冰面积量算	(67)
3.2 渤海海冰面积动态	(77)
3.3 本章小结	(80)
参考文献	(81)
第4章 渤海海冰厚度光谱信息特征	(82)
4.1 海冰厚度参数	(82)
4.2 海冰反射光谱的室内试验	(82)
4.3 盐池海水冰的室外光谱试验	(87)
4.4 渤海海冰的现场光谱试验	(89)
4.5 数字相机在现场平整冰光谱试验研究中的应用分析	(97)
4.5.1 必要性分析	(97)
4.5.2 可行性分析	(98)
4.5.3 数字相机在冰面成像的要求分析	(99)
4.6 渤海海冰反射光谱特征	(103)
4.6.1 渤海海冰的反射光谱特征研究现状	(103)
4.6.2 渤海一年生平整冰的反射光谱特征	(104)
4.7 本章小结	(112)
参考文献	(113)
第5章 渤海海冰厚度信息提取方法	(114)
5.1 基于冰型-反射率相互关系的海冰厚度信息提取方法	(114)
5.1.1 卫星过境同步光谱试验	(114)
5.1.2 渤海海冰厚度高时间分辨率遥感的最佳波段选择	(119)
5.1.3 遥感数据的大气辐射校正	(122)
5.1.4 基于遥感数据提取海冰厚度相关信息的步骤	(124)
5.1.5 针对 MODIS 数据的渤海海冰厚度信息提取方法的验证	(129)
5.1.6 NOAA/AVHRR 影像的冰厚信息提取分析	(130)
5.1.7 渤海北部典型冰情分析	(131)
5.2 基于冰厚-反射率相互关系的海冰厚度信息提取方法	(133)
5.2.1 海冰厚度的反演原理与方法	(133)
5.2.2 海冰厚度反演公式的参数	(135)
5.2.3 反演结果验证评价	(136)
5.3 基于多角度光学和热红外遥感的冰厚信息提取	(139)
5.3.1 渤海海冰表面粗糙特征观测试验	(139)
5.3.2 平整海冰多角度反射光谱观测试验	(147)
5.3.3 粗糙海冰表面的多角度辐射特征	(152)
5.4 本章小结	(164)

参考文献	(166)
第6章 渤海海冰厚度的时间变化特征	(168)
6.1 室内冻结试验	(168)
6.2 现场观测试验	(170)
6.2.1 辽东湾长兴岛观测试验	(170)
6.2.2 辽东湾鲅鱼圈观测试验	(173)
6.2.3 渤海湾黄骅观测试验	(175)
6.3 历史资料分析	(177)
6.4 海冰再生周期	(180)
6.5 本章小结	(181)
参考文献	(182)
第7章 渤海海冰资源储量估算及时空分布特征	(183)
7.1 渤海海冰资源储量的估算方法	(183)
7.1.1 数据来源及处理方法	(183)
7.1.2 海冰面积提取方法	(183)
7.1.3 海冰厚度提取方法	(186)
7.1.4 海冰资源储量时间序列的建立	(187)
7.1.5 海冰资源储量时间序列的延长	(189)
7.2 渤海海冰资源储量的时空变化特征	(194)
7.2.1 时间变化特征	(194)
7.2.2 空间变化特征	(198)
7.2.3 再生周期与潜在资源储量	(206)
7.2.4 极端年份的最大可能资源储量	(207)
7.2.5 2009~2010年冬季渤海海冰资源储量特征	(207)
7.3 本章小结	(213)
参考文献	(214)
第8章 渤海海冰开发对周边生态环境的影响评价	(215)
8.1 渤海海岸小气候的观测试验	(215)
8.1.1 研究背景及观测点布设	(215)
8.1.2 海陆风时空分布特征	(218)
8.1.3 海岸气温时空分布特征	(226)
8.2 渤海与环渤海地区年平均降水量的统计分析	(234)
8.2.1 研究区概况	(235)
8.2.2 资料来源与研究方法	(237)
8.2.3 主要结论	(239)
8.3 海冰开采对渤海周边地区冬季气候影响的数值试验	(241)
8.3.1 数值试验设计	(242)
8.3.2 模式验证——控制试验反映的模拟方案模拟能力说明	(243)

8.3.3 海冰变化对试验区气候影响的数值试验结果分析	(246)
8.3.4 主要结论	(249)
8.4 渤海海冰资源利用对海水盐分影响的数值模拟	(250)
8.4.1 渤海大范围结冰期盐分扩散的数值模拟	(250)
8.4.2 渤海海冰大规模开采后盐分扩散的数值模拟	(260)
8.4.3 主要结论	(263)
8.5 本章小结	(264)
参考文献	(265)
第9章 渤海海冰资源品质分析	(267)
9.1 海冰主要成分检测指标	(267)
9.2 海冰样品采集地点	(267)
9.3 海冰样品理化成分分析	(269)
9.4 本章小结	(274)
参考文献	(274)
第10章 渤海海冰资源开发区位评价	(275)
10.1 开发利用渤海海冰资源的基本区位要求	(275)
10.1.1 具备对海冰资源进行开发的区域需求	(275)
10.1.2 开发区域拥有优越的海冰资源及良好的资源生成条件	(277)
10.1.3 适于海冰资源开采的自然环境条件	(278)
10.2 影响渤海海冰资源开发区位的自然因素及其分布	(279)
10.2.1 海冰资源状况	(279)
10.2.2 海岸带及海底形态	(280)
10.2.3 海洋水文	(285)
10.2.4 区域气候	(287)
10.3 渤海海冰资源开发区位评价	(291)
10.3.1 渤海海区海冰资源开发适宜性评价	(291)
10.3.2 渤海海岸条件对海冰资源开发适宜性的影响分析	(293)
10.3.3 渤海各区域适宜性综合评价	(295)
10.4 本章小结	(300)
参考文献	(300)

彩图

第 1 章 渤海与渤海海冰概况

1.1 渤海概况

渤海是深入中国大陆的内海，它三面被陆地（辽宁省、河北省、天津市、山东省）所环抱，仅东部以渤海海峡与黄海相通，其具体地理位置为 $37^{\circ}07' \sim 41^{\circ}0'N$ ， $117^{\circ}35' \sim 122^{\circ}15'E$ 。渤海面积约为 $82\,700\text{ km}^2$ ，大陆海岸线长 $2\,668\text{ km}$ 。平均深度 18 m ，最大水深 78 m ， 20 m 以上的浅海域占渤海面积的一半以上。

渤海地处北温带，多年平均气温 10.7°C ，年降水量 $500 \sim 600\text{ mm}$ 。渤海水温变化受北方大陆性气候影响，2 月为 0°C 左右，8 月约为 21°C 。严冬来临，除秦皇岛、大连等以外，沿岸大都冰冻，3 月初融冰时还常有大量流冰发生。大陆河川大量淡水的注入，使渤海海水盐度降低，表层盐度年平均值为 $29.0\text{‰} \sim 30.0\text{‰}$ 。

渤海主要可以分为 4 个海区：北面的辽东湾、西面的渤海湾、南面的莱州湾以及渤海中部（图 1-1）。渤海各个海区的基本特征如下。

1. 辽东湾

辽东湾位于渤海北部，水深较大，最大水深可达 30 m ，面积约为 $28\,000\text{ km}^2$ ，是渤海最大的海湾。辽东湾呈东北-西南走向，大部分位于辽宁省境内，西南部属于河北省，有辽河、滦河等大型河流流入，主要海洋要素受陆地与河流的影响较大。

2. 渤海湾

渤海湾位于渤海的西部，最大水深为 28 m 左右，面积约为 $14\,000\text{ km}^2$ 。渤海湾呈东-西走向，沿岸分别属于河北省、天津市和山东省，有海河、蓟运河等大型河流流入，主要海洋要素受陆地与河流的影响较大。

3. 莱州湾

莱州湾位于渤海的南部，最大水深为 18 m 多，面积约为 $11\,000\text{ km}^2$ 。莱州湾呈东北-西南走向，全部位于山东省境内，有黄河、小清河等大型河流流入，特别是黄河对莱州湾影响较大。

4. 渤海中部

渤海中部是渤海中面积最大、水深最深的海区，最大水深为 78 m ，面积约为 $29\,800\text{ km}^2$ 。渤海中部距离大陆以及河口相对较远，因此主要海洋要素受到陆地与河流的影响较小，而渤海之外的黄海对其有重要影响（杨国金，2000）。

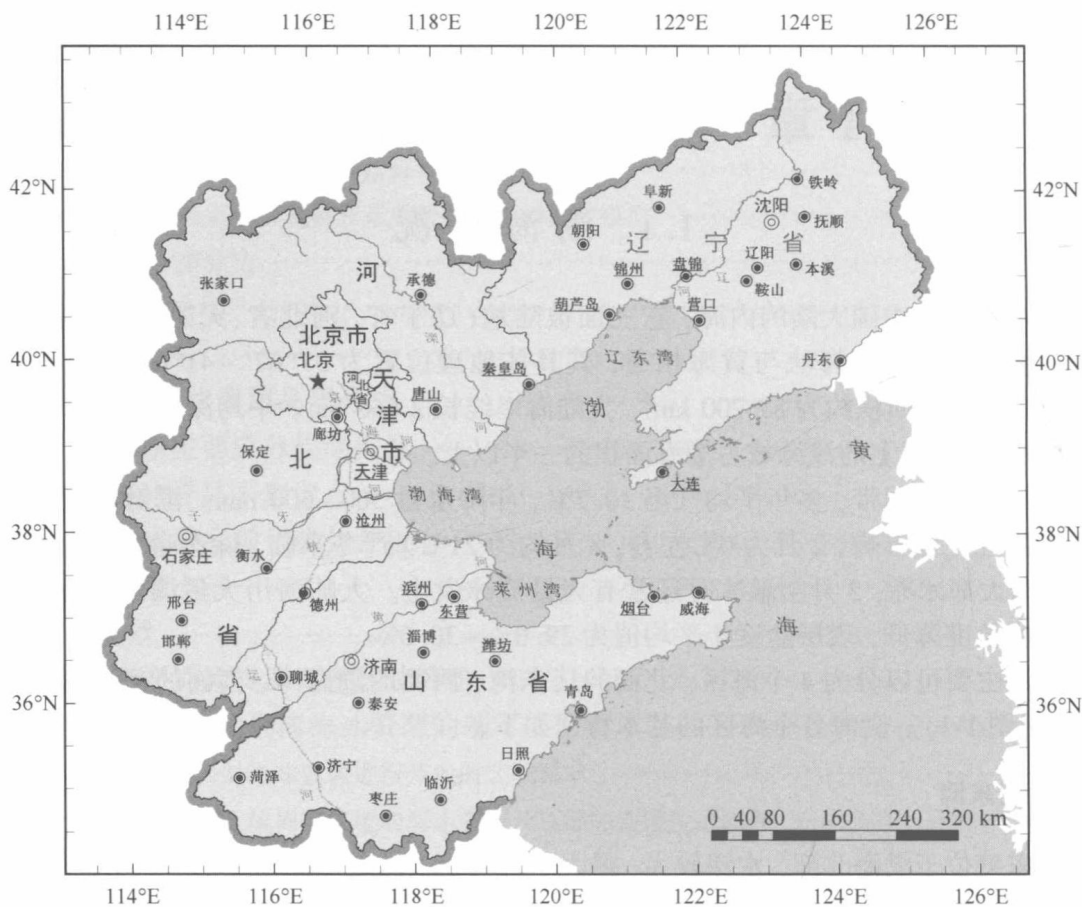


图 1-1 渤海及其各海区简图

1.2 渤海冬季的气候特点

海冰是海水在低温条件下的冻结物。渤海海冰的形成，与渤海冬季气候密切相关。

从气候学上讲，冬季是指连续 5 天的平均温度在 10°C 以下的时段。在渤海不同海区，冬季的起止时间不尽相同。辽东湾冬季大致是从 10 月中旬开始，至 4 月中旬结束，其间约 180 天；渤海湾冬季大致是从 10 月下旬开始，至 4 月上旬结束，其间约 160 天；莱州湾大致是从 11 月上旬开始，至 4 月上旬结束，其间约 150 天(国家气象信息中心气象资料室，2002)。

渤海冬季最冷的月份是 1 月，平均气温为 $-9\sim-3^{\circ}\text{C}$ ，平均最低气温为 $-14\sim-6^{\circ}\text{C}$ ，气温日较差为 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。其中，辽东湾底部的营口气温最低，1 月平均气温为 -9°C ，莱州湾底部的潍坊气温最高，1 月平均气温为 -3°C 。渤海平均年极端最低气温达 $-24\sim-14^{\circ}\text{C}$ 。

渤海冬季盛行偏北风，以北风、西北风为主，1 月平均风速为 $3\sim 5\text{ m/s}$ 。渤海冬季降水量较少，1 月降水量为 $5\sim 10\text{ mm}$ 。

1.3 渤海海冰的形成与发展

1.3.1 渤海海冰形成的因素

海冰形成和发展显然与海区状况和大气条件有关。影响海冰出现和分布的因素可概

括为气象要素和物理海洋要素两大类。气象要素包括气温、风向、风速和降雪量；物理海洋要素包括海水的温度、密度、盐度、水深、湍流等。

气温是最直接的因素，持续地低于冰点水温 and 过冷水温的累计负气温是海冰形成和发展的必要条件。冻结指数越大，海冰形成和发展得越快。

季风和回转流的方向是使初生冰晶在沿岸聚散的条件，当风向和流向有利于冰晶的聚集，海冰形成和发展得就快，否则海冰难以形成或形成得缓慢。沿岸冰脚带海冰的形成、堆积主要是风和流的作用。

频繁降雪和大量降雪，是海冰快速形成和发展的重要原因之一，大量降雪可直接形成海冰晶核和间接助长海冰的发展。特别是在潮间带的海水中，大量的雪晶会直接形成油脂状冰，涨潮时在岸边冰脚带可形成很高的冰坝；退潮时油脂状冰在潮间带可快速形成厚的单层冰，这种现象远远超过冻结指数的影响。

水深的影响较为明显，浅水域热容量小，而深水处热容量大，在浅水域或混合层内，充分发展的湍流运动使整层的海水温度几乎一致，因此海冰的冻结都是从沿岸浅水海域开始，逐渐向深水海域扩展。

盐度对海冰形成的影响很复杂。一方面冰点是盐度的函数，冰点随着盐度的增大而降低，因此盐度低的表层海水先结冰，盐度高的表层海水后结冰，所以河流入海口处，大量淡水的加入使海水盐度较低，是造成该区早于其他海区结冰并且冰情较重的一个原因。另一方面，水密度达到最大时的温度随盐度的增大而很快地降低，比冰点降低得快。当盐度大于 24.6‰ 时，海水最大密度时的温度低于冰点；而盐度小于 24.6‰ 时，海水最大密度时的温度高于冰点。假设初始均匀的水柱内盐度超过 24.6‰，表层海水受大气等要素冷却降温变冷，直至结冰。变冷的表层海水密度大于下层的海水密度，这样冷却的表层海水不断下沉，形成对流，使表面海水冻结，整层海水降温到或接近冰点。因此在此情况下表面海水一旦冻结，就迅速发展向下伸展。由于对流的形成，结冰之前需要冷却更多的海水，这延迟了结冰的时间。另外，海冰形成时在冰晶、冰针和冰片的合并过程中，一部分盐水被包围在合并时形成的冰穴内；而另一部分则析出下沉到下面的海水中，析出的盐水使冰层下海水的盐度和密度增加，加剧了下层海水的对流运动。同时，盐度的增加使冰点进一步降低，更加延缓了结冰的速度。

凝结核对海冰形成的作用同样明显。达到冰点的海水含有很多凝结核时会很快冻结，而没有或凝结核很少时，常有过冷却水出现，特别是在平静的海面上。但这种条件下一旦有冰晶生成，生成的冰晶就会成为凝结核而使海水很快冻结。

海冰形成后的进一步发展同样依赖于海洋和大气条件。大气通过各种物理过程造成海冰表面的降温或升温，进而通过海冰内部的物理过程而影响海冰的消融和发展。冰厚通过影响冰层中的导热通量而影响海冰的发展。在其他条件相同的情况下，海冰的增长速率随冰厚增大而减慢。因为冰层越厚，向上的导热通量越小。海洋中海冰下表面的热平流和湍流热交换也影响着海冰的进一步发展。

一般海冰的融化过程比其形成过程要快得多。海冰融化的详尽物理过程尚不明晰。一个较为明显的事实是，融冰期中白昼变长，太阳辐射加强，引起冰面融化和融冰加快，表面反照率减小，吸收更多的太阳辐射。随着海冰的融化，开始出现水道、垂直融洞和分散的融坑。融化到一定程度后，侵蚀作用加强，沿着水道缝出现冰裂。由于浪、流和风的作用，

冰裂进一步加剧,冰面积减少,冰动力和热动力相互作用加强,海冰加速崩溃,直至消失。

1.3.2 渤海海冰的发展过程

海水冷却引起的垂直对流,使对流层的海水达到冰点温度之后进一步冷却,海面开始结冰。冷却使表面薄层海水过冷产生结晶核,然后生成很小的冰晶,称之为冰针。刚生成的冰针很小,用肉眼不易分辨。

当冰在平静无浪的冷水中形成时,冰针在整个生长过程中可由极小的冰球体发展成六角星形晶粒(Arawaka, 1954)。六角星形晶粒彼此冻结在一起,最终就形成表面光滑的冰皮,以后厚度逐渐增加。这些冰皮随着厚度的增大从而形成比较硬的尼罗冰。尼罗冰继续增厚而不产生变形,被称为平整冰。大冰盘平整冰或冰皮断裂后,可形成中冰盘平整冰、小冰盘平整冰或冰块、碎冰。平整冰或冰皮在风和流的作用下容易发生单层重叠和多层重叠,这种冰被称为重叠冰和多层冰。

在多数情况下,形成冰晶的初期海面有波浪。风越大,冷却就越快,单位体积内就产生更多的冰晶,并且形不成六角星形冰晶,而是杂乱无章的像沙子似的粒晶冰。另外,波浪很大时,不仅海面而且海水内部也会产生粒晶冰,并上浮到表面。这样,在海面的一定水深范围内,破碎的粒晶冰就更为集中,漂在水面上成为油脂状冰。

油脂状冰和冰块在岸边可随海浪而被堆积到岸上和礁石上形成较宽的冰脚带。按堆积程度和形状,可形成冰墙、冰坝。

油脂状冰形成后,如果海面平静,退潮时会部分滞留在沙滩上。初期其表面平整、冰质松软,称之为海绵状冰。在持续低温以及海水多次反复涨落潮的浸入下,海绵状冰逐渐可形成坚实的平整冰或平整固定冰。

油脂状冰在涌的作用下可不断地做上下运动。在运动过程中,大小约为波长一半的油脂状冰就被集合冻结在一起形成小冰盘或冰块。这些油脂状冰形成的初始冰盘一般强度较低且较柔软,相互碰撞和摩擦后边缘易卷曲形成圆盘状的冰块,其边缘微有上卷,这种冰被称为莲叶冰。

莲叶冰如果在潮间带搁浅,在冷空气和浅水浪、流的作用下,很容易形成形状不规则的堆积冰或大小不等的冰丘。由于潮流的作用,在厚冰块和冰丘之间常出现水面相对平静的水坑、水池或冰间湖。在冷空气作用下,水坑可迅速发展成较厚的平整冰。这些冰与周围的厚冰块、冰丘、冰坝以及礁石冻结在一起,在岸边可形成一定宽度的固定冰区,固定冰宽度与地形变化有关。

在离岸海域,如果海面气温继续降低,莲叶冰本身变硬,互相冻结在一起,形成表面略微粗糙且尺度各异的冰盘。随着冰盘厚度的变化,常用灰冰、灰白冰和白冰描述这些冰盘。

在(渤海)离岸较近的海域,冰的重叠和破碎如果发生在大冰盘之间,或发生在大冰盘与岸边平整固定冰之间,由于碎冰的堆积就有可能形成冰脊,冰脊特征通常用帆高和龙骨深度描述。

渤海海冰按其生长过程、存在形态、表面特征、冰块尺寸、晶体结构等分类存在的类型如下所述。

按其生长过程存在的冰型有初生冰(冰针、油脂状冰、海绵状冰)、尼罗冰(包括冰皮)、莲叶冰、灰冰、灰白冰、白冰(表 1-1)。

表 1-1 渤海海冰冰型定义*

冰 型	定 义
初生冰	由冰针和冰晶冻结的薄冰片
冰皮	厚度小于 5 cm 有弹性、易破碎的薄冰层
尼罗冰	厚度为 10 cm 之内,能产生指状重叠的薄冰层
莲叶冰	厚度为 10 cm 之内,直径为 0.3~3 m 的圆形冰块
灰冰	厚度为 10~15 cm 的初期冰,受到挤压时发生重叠
灰白冰	厚度为 15~30 cm,受到挤压时大多呈脊
白冰	厚度为 30~70 cm 的一年冰
中一年冰	厚度为 70~120 cm 的一年冰
厚一年冰	厚度超过 120 cm 的一年冰

* 改编自文献:杨国金,2000。

按存在形态的分类有固定冰和流冰,固定冰包括沿岸冰、冰脚、锚冰、搁浅冰等。

按海冰表面特征分类有平整冰、重叠冰、堆集冰、冰脊、冰丘等。

按冰块尺寸分类有冰原冰、大冰盘、小冰盘、莲叶冰、冰块、碎冰。

按晶体结构分类有柱壮冰和粒状冰。

由表 1-1 中定义可见,冰型的差异不是由于海冰本身的差异造成的,而是由于冰厚度的差异引起的形态差异。从宏观上来看,渤海海冰的形成、发展乃至消失对应的就是渤海海冰的不同冰期。渤海主要海区冰期的划分如表 1-2 所示。

表 1-2 渤海主要海区海冰冰期*

项目	辽东湾					渤海湾			莱州湾		
	北岸	西北	西南	东北	东南	北	西	南	西	南	东
初冰日(日/月)	23/11~26/11	3/12	20/11	17/11	3/2	10/12	22/12	10/12	5/12	15/12	18/12
终冰日(日/月)	25/3	15/3	10/3	22/3	15/3	20/3	25/2	9/3	5/3	26/2	25/2
冰期/天	120	108	103	120	68	108	55	90	80	—	—
盛冰期初日(日/月)	15/12	25/12	10/1	20/12	20/1	15/1	13/1	27/12	25/12	—	5/1
盛冰期终日(日/月)	5/3	5/2	25/1	2/3	17/2	10/2	2/2	20/2	20/2	—	10/2
盛冰期/天	85	65	27	72	18	20~30	12	55	50	—	20~25

* 改编自文献:杨国金,2000。

根据海冰观测规定,表 1-2 中海冰的初冰日和终冰日分别指的是观测海区范围内海冰最早出现或者最晚消失的日期。从初冰日到终冰日的这段时间被称为冰期,也称为总冰期。从表 1-2 中看出,辽东湾的冰期最长,大约为 4 个月。

1.4 渤海冰情特征

1.4.1 渤海冰情的空间特征

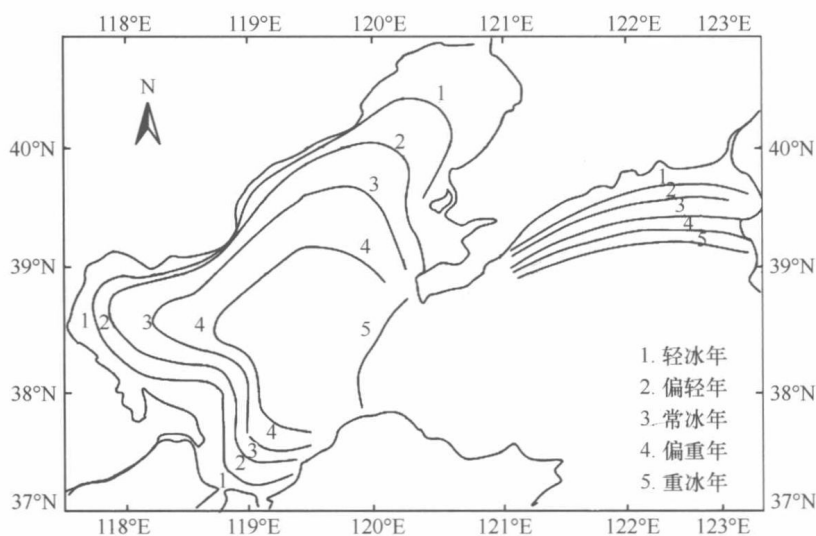
海冰的形成和分布是区域气象要素和物理海洋要素共同作用的结果,具有明显的区域差异性。渤海冰情的空间特征主要表现在不同海区的冰情差异(辽东湾、渤海湾、莱州湾以及渤海中部),除冰情很重的年份之外,渤海中部很少有海冰分布,因此渤海冰情的空间分布总体特征是:近岸冰厚,北多南少,主要集中在辽东湾、渤海湾和莱州湾。

辽东湾的海冰范围最大,在冬季风的作用下,不断向湾口扩展。海冰的输送一方面扩展了海冰的外缘线;另一方面输出的海冰不断降低海水温度,使之更容易结冰。受逆时针沿岸流的影响,海冰被从北岸向东输送,在东岸鲅鱼圈外海形成大范围的堆积冰区。西岸主要是平整冰,以单层冰为主,厚度不大。

渤海湾的海冰受环流的影响主要沿 15 m 等深线分布,但在河口附近冰区范围较大。在冬季风作用下,海冰被不断向渤海湾的西部和南部输送,在这里形成重叠和堆积的冰区。由于气象条件有利于海冰维系在渤海湾,历史上渤海湾曾出现严重的冰情。近年来由于气候变暖的因素,渤海湾冰情不重。

莱州湾结冰晚、融冰早,冰情不重,一般 12 月开始结冰,2 月底海冰全部融化。莱州湾西部靠近黄河三角洲的海域冰情较重,主要是那里的海水盐度低、海岸地形和风场相互作用有利于堆积以及三角洲沿岸浅滩面积大等原因。而东部海区各种因素都不利于海冰累积,冰情较轻。在河口和浅滩区,极端年份的海冰堆积高度可以达到 3 m,海上固定冰厚度可以达到 40 cm。莱州湾融冰虽早,但冰情不稳定,容易发生反复。

冰情的空间特征是由多种因素决定的。国家海洋局于 1973 年制定了《中国海冰冰情预报等级》,渤海和北黄海轻冰年、偏轻年、常冰年、偏重年、重冰年的海冰分布范围如图 1-2(a)所示,渤海常冰年,轻冰情年份、重冰情年份冰厚分布如图 1-2(b)、(c)、(d)所示。



(a) 各种冰情年的海冰分布范围