

渤海海冰淡化原理与技术

顾 卫 史培军 陈伟斌 解利昕 等著
王少新 宗 智 谭 蔚 许映军



科学出版社

渤海海冰淡化原理与技术

顾 卫 史培军 陈伟斌 解利昕 等著
王少新 宗 智 谭 蔚 许映军

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在完成科学技术部国家科技支撑计划重大项目课题“渤海海冰资源开发利用关键技术及试验研究”(课题编号:2006BAB03A03)和国家发改委高技术产业发展项目“渤海海冰淡化关键设备研制及工程试验”(项目编号:[2007]2003)部分工作基础上撰写而成。书中介绍了渤海海冰的基本特征,提出了海冰脱盐的原理与方法,研发了海冰淡化的技术与设备,分析了海冰淡化的工艺特点和工程试验结果,探讨了海冰水的水质特征和工业利用模拟初步效果。

本书是海冰资源开发利用的技术基础,可作为物理海洋、海冰工程、海冰灾害、海水淡化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

渤海海冰淡化原理与技术 / 顾卫等著. —北京:科学出版社,2014. 11

ISBN 978-7-03-042355-9

I. ①渤… II. ①顾… III. ①渤海-海冰-海水淡化 IV. ①P747

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 254258 号

责任编辑:彭胜潮 景艳霞 / 责任校对:李 影

责任印制:肖 兴 / 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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 11 月第一次印刷 印张:12 1/2 插页:4

字数:300 000

定价:99.00 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 $37^{\circ}07' \sim 41^{\circ}00'N$ 、 $117^{\circ}35' \sim 121^{\circ}10'E$ 。

渤海是我国的内海，它三面环陆，北面、西面、南面分别与辽宁省、河北省、天津市和山东省三省一市毗邻，东南面通过渤海海峡与黄海相通，辽东湾、渤海湾、莱州湾这三大海湾构成渤海的主体，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 ，沿岸水浅处水深只有几米，最大水深 78 m 。渤海海峡口宽约 59 n mile ，渤海总容量约为 $1\,730 \text{ km}^3$ 。

渤海是我国北方的海上交通要道。它拥有 40 余个港口，构成中国最为密集的港口群；它拥有辽河油田、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；它盛产对虾、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域。

渤海沿岸是以京津冀（北京市、天津市和河北省）为核心、以辽东半岛和山东半岛为两翼的环渤海经济区。它包括北京市、天津市、河北省、山东省、辽宁省三省两市，面积 51.8 万 km^2 ，占全国陆地总面积的 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% 。渤海沿岸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，却长期以来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“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。水资源短缺已成为制约 21 世纪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的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。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的发展。作为一种可靠的工业技术,它使海水淡化产业成为新兴产业部门。目前全球已有120多个国家和地区的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。50余年的发展,已经形成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,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条新途径,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科技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科技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。

“十一五”期间,在科学技术部、国家海洋局、国家发展和改革委员会以及教育部的大力支持下,分别启动国家科技支撑计划重大项目课题“渤海海冰资源开发利用关键技术及试验研究”(课题编号:2006BAB03A03)和国家高技术产业发展项目“渤海海冰淡化关键设备研制及工程试验”(项目编号:[2007]2003),重点开展海冰采集-脱盐-储运等关键技术研究、海冰破集-采运-脱盐成套关键设备和装置研究、万方级海冰采集淡化工程试验,实现了破冰、采冰、输冰、脱盐、存储等环节的设备串联和技术集成,使海冰淡化从科学设想转变为技术现实,并通过工程试验获得淡化产量、水质和成本等重要数据,为海冰淡化向产业化方向发展奠定了技术基础。除此之外,北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室以重点项目“渤海海冰淡化关键技术稳定性试验与产业化布局研究”(项目编号:2010-TD-02)、“海冰破碎设备研制与海冰淡化工程试验”(项目编号:2011-TDZD-050)对海冰淡化研究给予了支持,使海冰淡化在技术细节和配套设备等方面得到了进一步完善。

本研究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、天津大学、大连理工大学、国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所、天津城建大学等。经

过研究人员的努力,在海冰脱盐原理与方法、海冰淡化技术与设备、海冰淡化工程试验、海冰淡化水水质与工业利用等方面取得了新的进展。本书就是以上述国家和部门重点项目的研究成果为基础,对前一阶段海冰淡化技术与设备研究的总结和提炼。

本书由顾卫、史培军、陈伟斌、解利昕、王少新、谭蔚、宗智、许映军等共同撰写。各章的主要作者如下。

前言:史培军、顾卫;

第一章:顾卫、史培军、林叶彬、陈伟斌;

第二章:陈伟斌、袁帅、许宁、刘雪琴;

第三章:顾卫、陈伟斌、马骏、解利昕、谭蔚、许映军、李凭力、林叶彬、张淑芳;

第四章:王少新、宗智、解利昕、顾卫、谭蔚;

第五章:顾卫、陈伟斌、解利昕、许映军、林叶彬、王少新、宗智、李澜涛、刘成玉、钞锦龙、常志云;

第六章:许映军、程方、吕经烈、关毅鹏。

渤海海冰淡化技术与设备研究是一件新生事物,它经历了从无到有、从室内到野外、从陆地到海岸、从单件设备到系统连接的研制开发过程,目前虽然已经初具雏形,但在效率、能耗、品质、自动化等方面还存在诸多问题,需要进一步深入开展技术研发、设备研制和中间试验等工作。我们相信,有社会发展的需要、有政府部门的支持、有企业部门的参与、有专家学者的指导,海冰淡化一定能够走进产业化,海冰将成为造福于人类社会的新型水资源。

感谢科学技术部、国家海洋局、国家发展和改革委员会、教育部对渤海海冰淡化项目的支持和资助!感谢北京师范大学、国家海洋环境监测中心、天津大学、大连理工大学、国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所、天津城建大学等单位对项目研究人员的鼓励和支持!感谢所有关心、支持、批评海冰项目的人!

本书在撰写过程中,引用和参考了前人和相关学者的研究成果,在此一并感谢!

由于时间和水平所限,本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!

目 录

前言

第1章 绪论	(1)
1.1 海冰淡化的由来	(1)
1.1.1 环渤海地区的经济地位与人水矛盾	(1)
1.1.2 渤海海冰概况	(3)
1.1.3 海冰淡化科学设想的提出及发展历程	(5)
1.2 海冰淡化的意义	(6)
1.2.1 全球海冰分布	(6)
1.2.2 海冰开采与减轻海冰灾害	(6)
1.2.3 海冰淡化的意义	(7)
1.3 海冰淡化与海水淡化的关系	(7)
1.3.1 海水淡化的发展历史与现状	(7)
1.3.2 海水淡化面临的问题	(9)
1.3.3 海冰淡化是海水淡化的延伸和补充	(10)
参考文献	(11)
第2章 海冰基本特征	(12)
2.1 构造特征	(12)
2.1.1 冰晶结构	(12)
2.1.2 海冰晶体结构类型	(13)
2.1.3 冰层结构	(13)
2.2 盐度特征	(15)
2.2.1 定义与取值范围	(15)
2.2.2 影响因素	(15)
2.2.3 卤水成分	(16)
2.2.4 盐分排出机制	(17)
2.2.5 海冰盐度的冰层分布	(17)
2.3 力学特征	(18)
2.3.1 海冰压缩强度	(18)
2.3.2 海冰剪切强度	(22)
参考文献	(24)
第3章 海冰脱盐原理与方法	(26)
3.1 重力脱盐	(27)
3.1.1 重力脱盐原理	(27)
3.1.2 影响脱盐的参数	(30)
3.1.3 钢箱试验	(32)

3.1.4 脱盐率与损失率	(37)
3.2 离心脱盐	(38)
3.2.1 离心脱盐原理	(38)
3.2.2 离心脱盐方法	(38)
3.2.3 影响离心脱盐的因素	(39)
3.2.4 脱盐率与损失率	(39)
3.3 控温脱盐	(40)
3.3.1 控温固态脱盐原理与方法	(40)
3.3.2 控温微融脱盐试验	(42)
3.3.3 控温固态脱盐试验装置	(48)
3.3.4 控温固态脱盐试验	(54)
3.3.5 控温固态脱盐小试工艺优化	(57)
3.4 浸泡法脱盐	(59)
3.4.1 浸泡脱盐原理	(59)
3.4.2 浸泡脱盐方法	(59)
3.4.3 脱盐率与损失率	(60)
3.5 挤压脱盐	(61)
3.5.1 挤压脱盐原理	(61)
3.5.2 挤压脱盐方法	(62)
3.6 反渗透脱盐	(63)
3.6.1 反渗透脱盐原理及特点	(64)
3.6.2 渗透压	(65)
3.6.3 反渗透膜	(66)
3.6.4 膜组器	(67)
3.6.5 海冰融水反渗透脱盐试验	(67)
3.6.6 脱盐率与回收率	(79)
3.7 雾化冷冻脱盐	(80)
3.7.1 雾化冷冻脱盐原理	(81)
3.7.2 雾化冷冻脱盐方法	(82)
3.7.3 脱盐率与损失率	(83)
参考文献	(83)
第4章 海冰淡化技术与设备	(86)
4.1 海冰采集技术与设备	(86)
4.1.1 海上破冰技术和设备	(86)
4.1.2 海上集冰技术与设备	(110)
4.1.3 岸边采冰技术与设备	(112)
4.1.4 岸上运冰技术与设备	(123)
4.2 海冰脱盐技术与设备	(125)
4.2.1 重力脱盐池	(125)

4.2.2 离心脱盐机	(126)
参考文献	(139)
第5章 海冰淡化工程试验	(140)
5.1 海冰淡化工艺与技术集成	(140)
5.1.1 陆基海冰淡化工艺与技术集成	(140)
5.1.2 岸基海冰淡化工艺与技术集成	(144)
5.2 海冰淡化现场试验	(149)
5.2.1 河北黄骅重力脱盐试验	(149)
5.2.2 辽宁瓦房店离心脱盐试验	(155)
5.3 海冰淡化成本构成	(161)
5.3.1 重力脱盐成本	(161)
5.3.2 离心脱盐成本	(165)
参考文献	(165)
第6章 海冰水水质与工业利用	(167)
6.1 海冰融水和海冰淡化水水质特征	(167)
6.1.1 海冰融水水质特征	(167)
6.1.2 海冰淡化水水质特征	(170)
6.2 海冰融水工业利用试验	(177)
6.2.1 试验方法	(177)
6.2.2 试验结果与分析	(180)
参考文献	(189)

彩图

第 1 章 绪 论

1.1 海冰淡化的由来

1.1.1 环渤海地区的经济地位与人水矛盾

1. 地域范围与经济发展现状

环渤海地区位于我国北方，地域范围的划分主要有 4 种不同观点。广义的环渤海为五省两市(辽宁、河北、山东、山西、内蒙古、天津、北京)，狭义的环渤海仅包括辽宁、河北、山东、天津三省一市。本书研究所指的环渤海地区为辽宁、河北、山东、北京、天津三省两市(图 1-1)，全区陆域面积达 51.45 万 km²，占全国陆地总面积的 5.4%。

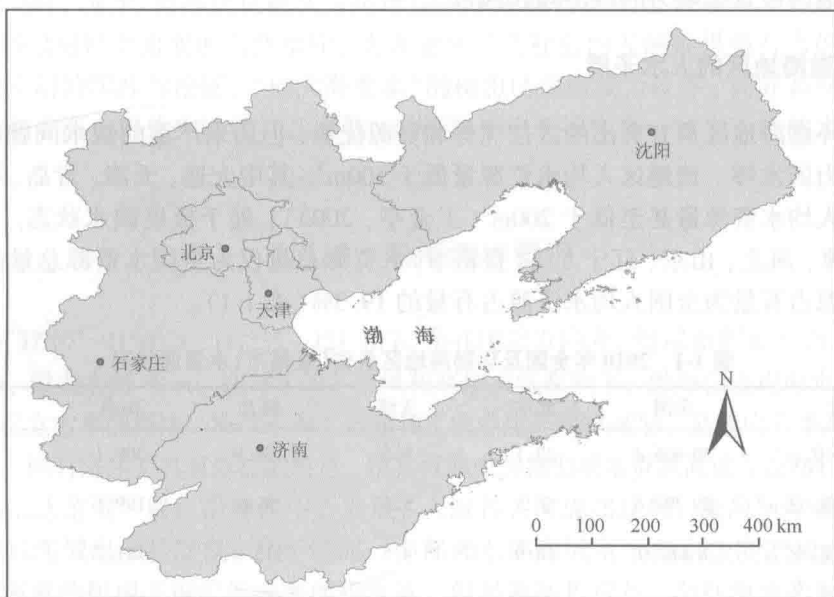


图 1-1 环渤海地区位置图

环渤海地区既是我国北方内陆与沿海的天然结合部，又是通向亚太地区和走向世界的出海口，对于带动我国西部大开发和东北老工业基地的振兴、缩小东西南北之间的差距、实现国家区域协调发展战略具有特殊的作用。同时，环渤海地区作为我国政治文化中心、国际交往中心以及能源和原材料生产基地，在亚太地区国际经济分工合作中扮演着越来越重要的角色。

环渤海地区城市密集，已形成了京津唐、山东半岛、辽中南 3 个实力较强的城市群。它们之间优势互补，是面向世界、技术先进的制造业基地以及我国最具发展潜力和活力

的经济区域。该地区与世界上大多数国家均有着广泛的联系,特别是和东北亚地区交往与合作更为密切。区域内 60 余个大小港口构成了功能完善的港口群,与世界 160 余个国家、数百个港口有着贸易往来,港口货物年吞吐量占全国的 40%,港口外贸出口总量占全国的 20%。营口、唐山、曹妃甸、日照、烟台、威海等港口发展势头强劲,凭借得天独厚的区位优势、丰富的资源、雄厚的产业基础,在我国对外开放和国民经济发展中具有重要的战略地位和不可替代的作用。

此外,该地区广阔的市场空间、优秀的技术人才、丰富而低廉的劳动力资源、良好的发展基础和巨大的发展潜力,吸引了世界众多国家的产业转移。特别是京津(北京和天津)地区,在华投资的 80 多家跨国公司中,研发机构设立在北京的约占 40%,世界 500 强企业在天津设有 200 余家生产性投资企业。

近年来,环渤海区域经济增长迅速,我国华北、东北和西部地区丰富的资源、巨大的市场又为该区域的经济发展提供了广阔的空间。这些条件有利于实现区域间的产业互动和经济融合发展。天津滨海新区战略地位的提升,对中西部的带动作用正在进一步增强。在未来若干年的发展中,该区域经济有望超过“长三角”和“珠三角”,成为对全国乃至东北亚地区极具影响力的经济隆起地带。

2. 环渤海地区的人水矛盾

虽然环渤海地区具有突出的区位优势和资源优势,但历来严重的缺水问题制约了区域经济潜力的发挥。该地区人均水资源量低于 500m^3 ,其中大连、天津、青岛、等北方沿海城市的人均水资源量甚至低于 200m^3 (王金亭, 2003),处于极度缺水状态。2010 年,北京、天津、河北、山东、辽宁 5 省(直辖市)水资源总量仅为全国水资源总量的 3.5%,人均水资源占有量为全国人均水资源占有量的 19.3%(表 1-1)。

表 1-1 2010 年全国及环渤海地区各省(直辖市)水资源状况

项目	全国	北京	天津	河北	山东	辽宁
水资源总量/亿 m^3	30 906.4	23.1	9.2	138.9	309.1	606.7
地表水资源量/亿 m^3	29 797.6	7.2	5.6	56.6	199.1	554.0
地下水资源量/亿 m^3	8 417.0	18.9	4.5	112.9	181.2	146.8
人均水资源量/ m^3	2 310.4	124.2	72.8	195.3	324.4	1 392.1

21 世纪以来,该地区人口数量稳步增长,经济发展水平显著提高,对水资源的需求也持续增加。2010 年,全区总人口为 2.44 亿,占全国总人口的 18.2%;国内生产总值(GDP)101 359.49 亿元,占全国生产总值的 25.3%;水资源总量 1 087 亿 m^3 ,仅占全国水资源总量的 3.52%;人均水资源占有量 445 m^3 ,不足全国人均水资源占有量的 1/5(表 1-2)。因此,水资源短缺仍然是该地区面临的最为突出的问题;若不妥善解决,势必影响整个经济圈的发展前景。

表 1-2 21 世纪以来环渤海三省两市人口、经济与水资源状况(《中国统计年鉴》)

年份	人口		经济		水资源	
	总量/亿	占全国的比例/%	GDP/亿元	占全国的比例/%	总量/亿 m ³	人均占有量/m ³
2000	2.24	17.3	22 419	25.4	—	—
2005	2.44	18.2	47 206	25.7	962	394
2010	2.44	18.2	101 360	25.3	1 087	445

注:《中国统计年鉴》中未列入 2000 年水资源数据。

为了增加该地区淡水资源总量,国家从 20 世纪末至 21 世纪初先后启动南水北调、雨水资源化等项目,但是这些“开源”措施本身都有许多亟待解决的问题。跨流域调水只是对我国水资源在区域上再分配,并不能根本解决中国淡水储备不足的问题。长距离调水不仅工程浩大,投资甚多,终端供水成本很高,水质的改变和沿途水量的损耗会使这部分水资源的分配和利用效率降低,并且有可能对引水区和受水区的生态环境产生不利的影响(张宪宏,2002;沈焕庭等,2002)。雨水资源化受降水的时空分布影响很大,因而水量极不稳定。人工改变地表径流以后,还可能带来新的环境问题。

与此同时,海水/海冰淡化被认为是增加淡水来源的有效途径之一。利用天然的地理优势,将渤海辟为重要的天然水库,为该地区经济社会的发展提供强有力的水资源保障。经过长期的实践与论证,“向大海要水”的构想已逐渐成为政界、商界和学界人士的共识。伴随着海水淡化方法的日益成熟,渤海海冰也开始作为一种季节性的水资源而被重新认识。

1.1.2 渤海海冰概况

渤海(37°07′~41°00′N, 117°35′~121°10′E)是我国北方内海,海域面积 8.27 万 km²,平均水深 18 m,最大水深 78 m。在每年的冬季风和寒潮天气影响下,渤海会出现海水冻结现象,形成数十亿立方米的海冰。海冰给海上运输和工农业生产带来威胁,是造成冬季海上灾害的主要原因。同时海冰又具有低盐的特点,使其可能成为新型淡水资源而被开发和利用。

渤海结冰范围一般由沿岸向中心发展,入海各大河流如辽河、滦河、大清河、海河、黄河入海口海域海水盐度低,易于结冰。中部和东部海域由于海水盐度增加,结冰比较困难,在海流的作用下难以形成大面积海冰。但是海冰形成后,会在海流影响下离开源地,形成新的时空分布特征。就多年平均状况而言,渤海北部海域冰情重于南部,西部重于东部,但不同年份的冰情差异明显。

根据海冰生成、扩张和消融的过程,可将渤海海冰冰期分为 3 个阶段,即初冰期、盛冰期和融冰期。海冰的形成与气象要素和物理海洋要素关系密切,极端低温、负积温、风浪、海水盐度、海岸类型等均会对海冰的分布产生影响,因而海冰生、消的时间和冰情状况具有明显的区域差异。渤海湾沿岸海区通常在 12 月上旬、中旬至翌年 2 月中下旬或 3 月有海冰,且大部分集中于浅滩、河口海区;辽东湾沿岸海区通常在 11 月中旬、下旬或 12 月上旬至翌年 2 月末或 3 月中旬有海冰,2 月中旬分布范围最大(表 1-3)。

表 1-3 塘沽、秦皇岛、长兴岛海区冰期统计表

冰情年	塘沽(天津)			秦皇岛(河北)			长兴岛(辽宁)		
	初冰日 (月-日)	终冰日 (月-日)	冰期/天	初冰日 (月-日)	终冰日 (月-日)	冰期/天	初冰日 (月-日)	终冰日 (月-日)	冰期/天
常冰年	12-18	2-28	71	11-21	3-9	107	1-6	3-17	69
轻冰年	12-25	2-18	54	11-25	3-4	98	1-25	3-10	43
重冰年	12-23	3-17	83	11-22	3-14	111	12-28	3-20	81

注：表中数据从 1961~1991 年，其中轻冰年为 6 个。改编自文献：杨国金，2000。

结合冰期长短、海冰分布范围、海冰厚度等指标，可将渤海海冰冰情划分为 5 个等级，分别是轻冰年、偏轻年、常冰年、偏重年、重冰年，不同冰情年的海冰分布范围如图 1-2 所示。

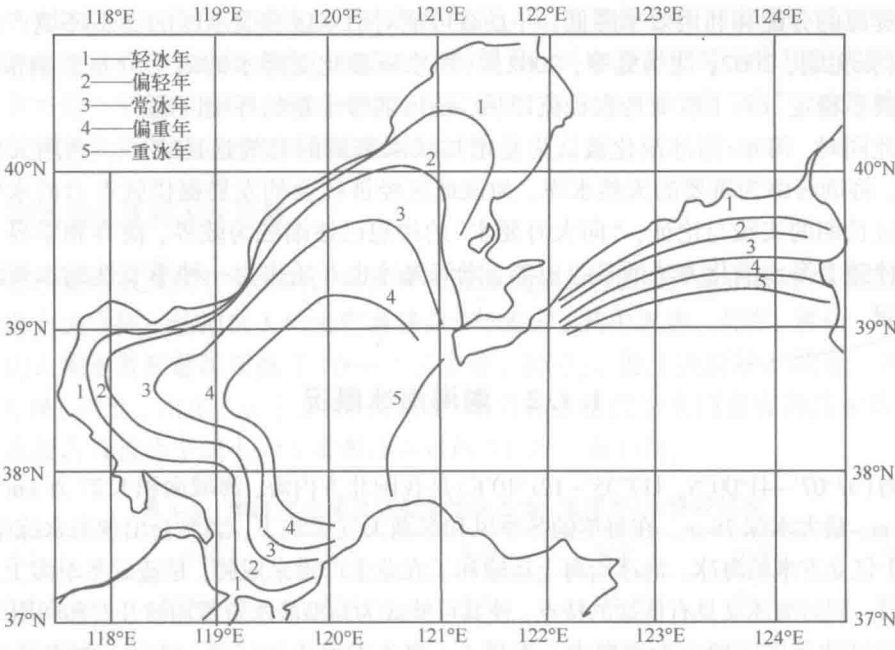


图 1-2 各种冰情年的海冰分布范围(丁德文等，1999)

海冰开采后，冰下水体还可继续冻结，形成新的海冰。渤海海冰工程性开采一般将厚度 10 cm 作为最小厚度。依据冰厚指标，可估算出渤海各海区常冰年可能开采次数是：辽东湾 7.4~13 次，渤海湾 3.7~7.4 次，莱州湾 1.9~3.7 次，渤海海冰资源潜在储量为 30 亿~200 亿 m³。即使不考虑再生周期，渤海海冰常冰年的资源储量也有 20 亿~40 亿 m³，距海岸 20 km 范围内的海冰可开采量为 10 亿~30 亿 m³。环渤海沿岸，大连、营口、盘锦、葫芦岛、唐山、天津、黄骅等港口城市，淡水资源均十分匮乏，将低盐度的海冰进行淡化处理后，可为这些地区的经济社会发展提供新的淡水资源。

海冰与海水相比，盐度、Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻等主要指标以及悬浮物、石油类等杂质的含量大幅降低，海冰水质的优劣将会对海冰资源利用产生重要影响。

1.1.3 海冰淡化科学设想的提出及发展历程

淡水是人类赖以生存的根本。在淡水资源缺乏的内陆干旱地区和部分沿海地区,人们很早就掌握了海水和苦咸水淡化方法,但现代意义上的海水淡化则是在第二次世界大战以后才发展起来的。随着社会对淡水需求量的不断增长,在许多干旱和半干旱地区,淡水已成为决定经济发展的重要因素,部门之间、地区之间和国家之间对淡水资源的争夺势必越演越烈。在中东、北美、西欧、东亚等淡水资源短缺,而经济较为发达的临海地区,海水淡化已成为获取淡水的一条主要途径。在过去 50 年里,海水淡化技术在许多沿海发达国家和地区得到较快发展,该技术的不断成熟为缓解这些地区水资源短缺的局面作出积极的贡献。

尽管海水淡化在理论上简单可行,但是生产过程中会涉及复杂的工艺流程,而且在北方地区还会受制于季节的变化。此外,海水淡化技术具有高能耗的特点,因而成本居高不下,只有在水资源缺乏、经济又相对发达的地区才能得到很好的推广。

借鉴海水淡化中冷冻法的基本原理,我国学者开创性地提出将海冰作为淡化原料的思路。在北半球中高纬度沿海地区,海冰资源十分丰富,每年因冰灾造成的损失难以计数。海冰在形成过程中大量的盐离子被排出,因此其盐度大大低于海水盐度。若能利用海冰的低盐特性,将其作为淡水资源进行开发利用,则不仅可以降低淡化成本和能耗,解决许多地区的缺水问题,还能化害为利,将灾害风险转化为资源优势,可谓一举多得。这一设想一经提出,即开始在渤海沿岸开展相关的试验研究。

1995 年,北京师范大学率先提出渤海海冰资源利用的研究设想后,随即成立了海冰课题组,并在随后 4 年间自行组织开展了海冰资源淡化的基础研究。2000 年,科学技术部农村与社会发展科技司首次将渤海海冰资源开发利用列入了“十五”科技攻关专项。

2001 年,教育部将渤海海冰资源开发与农业应用研究列入重点基金资助(02010),并对研究成果进行了鉴定;同期,科学技术部对渤海海冰作为淡水资源的可行性进行了预研资助。

2004 年,科学技术部农村与社会发展科技司将海冰资源开发和农业应用课题纳入 863 计划滚动项目(2004AA24020),2005 年通过了项目验收和成果鉴定。

2005 年 7 月,科学技术部与国家发展和改革委员会就海冰资源开发利用进展状况联合向国务院和全国人大进行了专题汇报,有关领导批示应予以重视和支持;同年 8 月,教育部向科学技术部提出开展海冰研究的建议并开展项目论证工作,科学技术部明确同意将海冰资源淡化研究优先列入“十一五”规划。

2006 年,863 计划重点项目课题“海冰资源淡化与利用技术”正式启动(2006~2010 年)。

基于以上课题,北京师范大学等单位对渤海海冰资源的自然储量、海冰生成过程和再生周期、海冰资源的时间保证率和空间分布、海冰开采利用对周边环境的影响、海冰脱盐机理和脱盐技术等问题进行了较系统的基础研究,并围绕海冰水利用对作物和土壤的影响等方面进行了深入的探讨。至此,海冰淡化实现了从理论到实践的跨越,海冰淡化水在农业领域的应用也已初见成效。随着研究的深入,海冰淡化的规模将逐步扩大,

淡化方法以重力脱盐为主,多种方法并举,淡化水的应用领域也从农业利用向工矿业利用、城市绿化和生活饮用拓展。

我国是世界上唯一开展海冰资源淡化研究和实际开发利用的国家。海冰资源淡化与利用技术研究将对缓解我国北方地区农业水资源短缺局面,促进环渤海地区城乡社会经济的可持续发展起到积极的作用,因此受到了社会各界的广泛关注。但是,海冰淡化技术当前仍处在技术创立、不断完善的过程之中,尚未全面进入产业化和规模化利用阶段。海冰采集、淡化规模将向大型化发展,低成本的集成技术是研究的重点方向(史培军等,2010)。

1.2 海冰淡化的意义

1.2.1 全球海冰分布

海冰分布于南北半球中、高纬海区,具有显著的季节和年际变化。北半球海冰覆盖范围3~4月最大,约1 100万 km^2 ,8~9月最小,为700万~800万 km^2 ,流冰群主要绕洋盆边缘流动,多为3~4 m厚的多年冰。南半球海冰大部分分布在南极大陆周围,最大和最小覆盖范围分别出现在9月(约1 880万 km^2)和3月(约260万 km^2),多为2~3 m厚的“一冬冰”。

北冰洋几乎终年被冰覆盖,冬季(2月)海冰面积约为洋面面积的84%,夏季(9月)也有54%。因四周受到陆地的阻挡,流冰容易叠加在一起,形成冰丘和冰脊。在北极海域,冰丘约占40%。白令海、鄂霍次克海和日本海,冬季也都有海冰生成;大西洋与北冰洋畅通,海冰更盛。格陵兰南部以及戴维斯海峡和纽芬兰的东南部也有海冰的踪迹,其中格陵兰和纽芬兰附近是北半球冰山最活跃的海区。

南极洲是世界上最大的天然冰库,全球冰雪总量的90%以上储藏在这里。南大洋上的海冰,不同于格陵兰冰原上的冰,也不同于南极大陆的冰盖,只有环绕南极的边缘海区和威德尔海,才存在着南大洋多年性海冰。在冬半年(4~11月),1~2 m厚的大块浮冰不规则地向北扩展,覆盖了40°S以南的南大洋的1/3。南极洲附近的冰山是由南极大陆周围的冰川断裂入海而形成的。

中国渤海和黄海北部,每年冬季皆有不同程度的结冰现象,且冰缘线与岸线接近平行;常年冰期3~4个月,盛冰期固定冰宽0.2~2 km。渤海北部冰厚多为20~40 cm,沿岸搁浅冰最厚可超过1 m;南部冰厚平均10~30 cm,最大厚度也可接近1 m。

全球大部分海冰分布地区虽然淡水总量不多,但人口稀少,缺水问题并不突出。而我国环渤海地区不仅人口众多、经济发达,而且降水和径流偏少,水资源供求严重失衡。将海冰作为淡水资源进行开发利用对于增加该地区的水资源供给具有重要的意义。

1.2.2 海冰开采与减轻海冰灾害

海冰是主要的海洋灾害之一,不仅对海洋水文状况、大气环流和气候变化会产生巨大的影响,而且会直接影响人类的社会实践活动。随着人类海上活动的增加,冬季海冰

的危害和威胁也日渐增多。大量的海水冻结会封锁港口、堵塞航路、冻结船舶、破坏海上采油平台、影响海洋捕捞和海水养殖,会对港口设施、海上交通和海洋生产造成严重威胁。有记录以来,我国渤海每年都有不同程度的冻结,渤海和黄海北部也是海冰灾害发生频率较高的海区。1936年、1947年、1969年、2001年和2010年的海冰灾害比较严重。仅2010年,海冰灾害造成的直接经济损失达63.18亿元,占全年海洋灾害损失的47.6%,受灾人口6万余人。为了降低灾害风险、减少损失,政府和相关职能部门采取了灾害预警、灾害评估、灾害保险等多种手段。积极做好海冰灾害综合风险防范,抵御海冰灾害是海上防灾减灾的一项重要工作。

海冰范围的扩大会形成海洋灾害,但同时也会形成重要的水资源,在海冰淡化处理后可获得大量淡水。所以,从资源开发利用的角度考虑,冰情越重越有利于开采。海冰开采后,冰量减少,造成的危害也会降低。如果开采能力持续增强,有望从根本上缓解海冰重灾区的灾情。

1.2.3 海冰淡化的意义

在缺水严重而海冰储量丰富的环渤海地区,将海冰采集、淡化后可以增加数量可观的淡水资源。

渤海是北半球海冰分布纬度最低的海域之一,同纬度的其他国家和地区皆不具备海冰淡化的条件,因此大规模海冰淡化只在我国才具有较大的发展前景。海冰开采能力的提升和淡化技术的日益成熟在增加淡水产量的同时,其意义还体现在以下三个方面。

(1) 海冰淡化工程将海冰灾害转化为淡水资源,有利于促进环渤海地区的社会经济发展,是一项具有战略意义的重要举措。

(2) 海冰淡化可作为海水淡化、跨流域调水、雨水资源化等项目的有力补充,将会减轻环渤海地区淡水供给的压力。

(3) 海冰淡化投资少、能耗低,淡化产生的浓盐水和污染物数量较少,因而对海洋环境产生的负面影响小,有利于节能环保。

1.3 海冰淡化与海水淡化的关系

海水淡化即利用海水作为原料,将水中盐分去除,以达到生产和生活需求的技术、工艺和方法。海冰淡化与海水淡化相比,最大的区别在于原料。由于原料的物理、化学性质方面的差异,两者在淡化方法和工艺上略有不同。总体而言,海冰淡化是在海水淡化基础上提出的一种将咸水转化为淡水的方法,因此很大程度上继承了海水淡化的优势,同时又有发展和创新。可以说海冰淡化与海水淡化既有区别又有联系。

1.3.1 海水淡化的发展历史与现状

地球表面约有71%的面积被水覆盖,但其中97.5%为海水和苦咸水,可以直接利用的淡水仅为全球总水量的0.025%,且时空分配严重失衡。目前,世界上大约50%的人

口生活在缺水严重的地区,由于人口增长、生活方式转变和水体污染等原因,这一数字到 2025 年时将增至 60%,水资源危机是人类必须克服的一大难题。

相对淡水而言,海水资源取之不尽。在沿海缺水地区,用海水生产淡水是一条行之有效的途径。目前,全球有 130 多个国家和地区采用海水或苦咸水淡化技术获得淡水,海水淡化系统数量与生产量以每年 10% 以上的速度增长,中国、日本、韩国、印度尼西亚、新加坡等亚洲国家也在积极发展或应用海水淡化水作为替代水源。

海水淡化中最古老的方法是蒸馏——将水蒸发而盐留下,再将水蒸气冷凝为液态淡水。传统蒸馏法会消耗大量的能源,并在仪器中产生大量的锅垢,得到的淡水却非常有限,因而生产效率不高。1953 年,一种利用反渗透(RO)淡化海水的方法问世,这种方法利用半透膜达到将淡水与盐分离的目的。反渗透法最大的优点就是节能,生产同等质量的淡水,其能源消耗仅为蒸馏法的 1/40。因此,自 1974 年以来,发达国家不约而同地将海水淡化的研究方向转向反渗透。

第二次世界大战后,国际资本大力开发中东地区的石油,使这一地区经济迅速发展,人口快速增加,这个原本干旱的地区对淡水资源的需求与日俱增。而中东地区独特的地理位置和气候条件,加之其丰富的能源资源,又使得海水淡化成为该地区解决淡水资源短缺问题的现实选择,并对海水淡化装置提出了大型化的要求。在这样的背景下,20 世纪 60 年代初,多级闪蒸(MSF)海水淡化技术应运而生,现代海水淡化产业也由此步入快速发展的时代。

正当反渗透和多级闪蒸研究方兴未艾之时,古老的蒸馏法也不断改进和创新。新的方法是降低气压,将经过适当加温的海水送入人造真空蒸馏室,海水中的淡水会在瞬间急速蒸发,全部变成水蒸气。许多真空蒸馏室连接起来,就能组成大型的海水淡化工厂。如果将海水淡化工厂与热电厂建在一起,利用热电厂的余热使海水增温,成本还会进一步下降。现在世界上的大型海水淡化工厂,大多采用新的蒸馏法。

除上述方法外,冷冻、太阳能、低温多效(MED)等方法也被广泛使用,方法与工艺的发展使海水淡化成本不断降低、操作更简便,海水淡化正在为越来越多的地区和人口提供优质的水源。

自 1954 年全球第一座海水淡化工厂在美国得克萨斯州建立以来,海水淡化产业以惊人的速度向亚洲、欧洲、大洋洲的许多国家和地区蔓延。尤其在在中东和一些岛屿地区,淡化水在当地经济和社会发展中发挥了重要作用。沙特阿拉伯在过去 20 多年内共建立了 30 家海水淡化厂,海水日淡化能力达 300 万 m^3 ;以色列 70% 的饮用水来自于海水淡化水,2008 年日产海水淡化水量达 73.8 万 m^3 ;阿联酋饮用水主要依赖海水淡化水,2003 年日产海水淡化水量达 546.6 万 m^3 ;意大利西西里岛 500 万居民,2008 年日产海水淡化水量为 13.5 万 m^3 ,占全部可饮用水源的 15%~20%。时至今日,全球有海水淡化工厂 1.3 万余个,日产淡水量 3 500 万 m^3 左右,其中 80% 用于饮用水,解决了 1 亿多人的用水问题。海水淡化水作为淡水资源的替代与增量技术,越来越受到世界上许多沿海国家的重视。

我国是一个水资源严重短缺的国家,有 10 个省人均水资源量低于 500 m^3 ,为重度缺水。特别是在一些沿海城市,水资源短缺严重制约了沿海地区的经济社会发展,大规模利用海水对于沿海地区未来发展将会产生深远的影响。由于水源不足,北方沿海城市