

# 渤海海冰作为淡水资源:脱盐机理与可利用价值

史培军, 哈斯, 袁艺, 周俊华, 谢锋

(北京师范大学 资源科学研究所, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 我国北部沿海地区缺水问题十分严重, 但冬季在渤海及黄海北部形成较大范围的海冰。海冰因其成冰过程中盐分大量析出而盐度很低, 可能成为解决这些地区缺水问题的重要淡水资源。论文根据实地观测和室内不同盐度海水的实验分析, 阐述了渤海海冰盐度变化和海水成冰脱盐过程, 并采用二次成冰脱盐和离心脱盐等方法, 分析了海冰经进一步人工淡化的可能性, 探讨了海冰作为淡水资源的可利用价值。

**关键词:** 海冰; 淡水资源; 盐度与水质; 利用价值

中图分类号: P731.15

文献标识码: A

文章编号: 1000-3037(2002)03-0353-08

渤海及黄海北部沿海地带是我国河网不发达的地区。该地区人口众多、城市密集、工农业较发达, 需水量极大, 淡水资源缺乏是制约该地区生活、生产水平迅速提高的一个重要因素。该地区附近最大的水资源是大面积不可直接利用的海水。海水淡化固然是一种措施, 但成本高, 难以推广。渤海和黄海北部又是我国纬度最高的海区, 每年冬季气温剧降而出现大面积海冰<sup>[1,2]</sup>。据研究, 海冰盐度远远低于相应的海水盐度<sup>[3]</sup>。1995年, 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 对取自河北黄骅港地区的天然海水、排沟渠近海水、海盐晒盐场海水等进行了室内结冰实验, 结果表明, 海水成冰后其盐度明显下降<sup>①</sup>。这种低盐度的海冰, 通过各种方法处理后开发利用, 有可能成为缓解该沿海地区淡水资源短缺的重要淡水资源。海冰作为淡水资源, 主要取决于其空间分布、水质、可开采利用的边界条件, 以及用户与其分布之间的时空关系。据测, 海冰作为淡水资源, 其储量足够缓解区域缺水的严重问题, 但其价值即海冰融水的质量如何, 目前还不清楚。以往对海冰的研究, 多数从灾害和工程角度探讨其物理及力学特征<sup>[4-6]</sup>, 以及从气候学角度探讨大气—海冰相互作用及其对全球气候的影响<sup>[7,8]</sup>。作为资源, 对其可利用性等方面还没有深入研究。为此, 笔者通过对渤海湾海冰的实地考察、现场观测和对该地区不同盐度海水的成冰及各种脱盐的模拟实验, 并结合前人研究成果, 对海水成冰脱盐机理和海冰作为淡水资源的可利用价值作一初步探讨。

## 1 方 法

在 1995 年室内实验的基础上, 2001 年 2 月, 在河北省黄骅港附近海域进行了实地考察, 对该地区近岸海冰进行了测量和采样分析。在附近地区取近岸海水、河口水、当地晒盐池水等不同盐度的海水进行了室内成冰及脱盐实验, 并进一步对部分样品做了二次成冰及离心脱盐等实验。对自然海冰, 由近岸向海上按 5cm 厚度进行分层取样, 以测得海冰盐度的水平和垂直变化规律。在进行成冰脱盐实验时, 考虑到盐水容器容量对结冰量、盐

收稿日期: 2001-07-16; 修订日期: 2001-11-09。

基金项目: 科技部农村与社会发展科技司资助。

第一作者简介: 史培军 (1959- ), 男, 陕西靖边人, 教授, 主要从事资源开发与减灾工作。

①袁艺. 渤海海水成冰及脱盐的实验研究. 北京师范大学本科毕业论文. 1995。

度的影响,同时为了避免容器中的咸水底部和侧部与外界进行热量交换,对于所取的各种海水,室内采用 800ml、1 200ml、1 600ml 三种不同保温容器进行装样,并利用 500 l 温控冰柜冻结,定期观察咸水结冰状况并测定相应的温度(每 10min 记录一次温度)。当冷冻 8~10 个小时后出现固定冰时,开始分时间取样(按温度状况,分 5 次取样,前 3 次取样间隔为 60min,后两次为 30min)。对取出样本进行冰水分离,以作成冰量和盐度分析,结果见表 1。对已知盐度的部分自然海冰融水和部分室内成冰的融水进行了二次成冰实验。对室内模拟海冰经粉碎后进行了离心脱盐实验。上述成冰和离心脱盐实验在河北省中捷友谊农场农业综合实验室进行,海水及海冰融水的盐度和其它指标的测定在北京师范大学测试中心完成。

表 1 不同盐度咸水的成冰量及盐度统计

Table 1 Statistics of the ice growth rate and salinity of salt water

| 原始样本<br>体积(ml) | 样本<br>类型 | 原始样本<br>盐度(‰) | 成冰率(%) |           | 成冰后的盐度(‰) |               |
|----------------|----------|---------------|--------|-----------|-----------|---------------|
|                |          |               | 平均值    | 范围        | 平均值       | 范围            |
| 800            | 海水       | 26.566        | 52.3   | 15.0~86.9 | 19.362    | 14.644~24.038 |
|                | 盐池一      | 30.242        | 57.2   | 27.5~91.3 | 19.972    | 16.326~25.014 |
|                | 盐池二      | 32.430        | 58.1   | 26.3~94.4 | 22.755    | 17.266~29.478 |
|                | 排沟       | 47.174        | 53.9   | 23.1~85.6 | 35.253    | 30.316~41.522 |
| 1 200          | 海水       | 26.566        | 40.0   | 6.7~73.3  | 18.861    | 15.980~22.700 |
|                | 盐池一      | 30.242        | 42.3   | 17.1~76.7 | 18.500    | 14.678~22.642 |
|                | 盐池二      | 32.430        | 49.8   | 17.1~85.4 | 20.679    | 15.854~27.414 |
|                | 排沟       | 47.174        | 43.6   | 10.0~77.9 | 33.609    | 29.248~38.056 |
| 1 600          | 海水       | 26.566        | 33.4   | 10.3~67.5 | 17.500    | 10.276~20.096 |
|                | 盐池一      | 30.242        | 35.3   | 16.3~70.0 | 17.840    | 10.582~20.858 |
|                | 盐池二      | 32.430        | 37.1   | 10.6~66.6 | 19.169    | 16.292~24.988 |
|                | 排沟       | 47.174        | 34.6   | 11.9~62.6 | 31.270    | 10.276~36.596 |

## 2 结果

### 2.1 自然海冰的盐度

根据对沿岸平整冰的分层采样分析结果(图 1),黄骅港附近海冰盐度在 1.4‰~4.0‰ 之间,平均 2.64‰,为底部海水盐度(26.6‰)的 1/6 以下。在空间上,盐度由近岸向海上递增,由海冰表层向底部与海水接触处趋于增加。其变化恰好体现了距海岸由近向远,以及由海冰顶部到底部与海水接触处,盐度逐渐增高的规律。辽东湾海冰盐度剖面都具有稳定的“C”字形分布,即由冰层顶部向中层盐度减低之后又向下增加<sup>[4]</sup>。

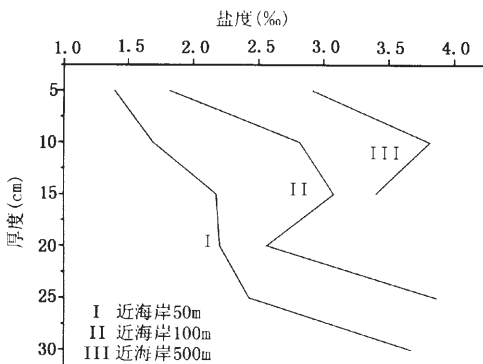


图 1 海冰盐度剖面

Fig.1 Sea ice salinity profile

### 2.2 海水的成冰率

在不同温度条件下,对不同盐度和不同容量海水的成冰率测定结果显示,原始海水样成冰率平均在 40%~60%之间(开始冷冻 8~10 小时后取样)。原始水样体积越大,成冰率越小,但成冰绝对量越大。成冰率与结冰时间成正相关关系( $R=0.6464\sim0.9129$ ,  $P<0.0001$ ),成冰率与温度之间呈负相关关系( $R=-0.69905\sim-0.54333$ ,  $P<0.0001$ ,图 2)。

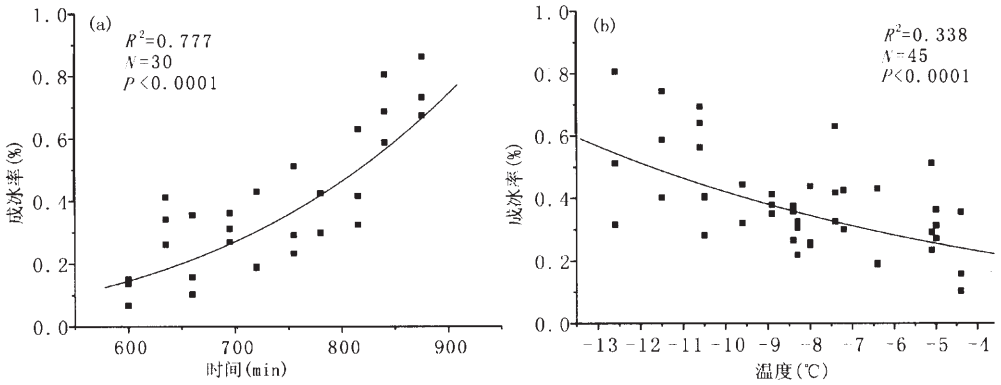


图 2 海水成冰率与时间 (a)和温度(b)的关系

Fig.2 Relationships between simulated sea ice growth rate and time intervals (a) and temperature (b)

### 2.3 海冰的脱盐

盐度测定结果显示,原始海水样容积越大,成冰融水的盐度越小。在实验室,由于样本容器体积的局限性,与海洋尺度无法比拟。原始水样容量是影响盐水脱盐的一个重要因素,容积越大,脱盐效果越好。

盐度与结冰时间和温度的关系呈抛物线关系:随着温度的下降(或结冰时间的增长),盐度先下降,然后又上升(图3(a)、(b))。从而盐度与成冰率有类似的关系,随着成冰率的上升,盐度先下降,然后又上升。结冰初期,随着冰龄的加长,成冰盐度下降,但随着冷冻时间的加长,成冰体积不断增大。这是由于样本容器的体积有限,盐分越来越不易析出,成冰盐度又有反弹的现象。

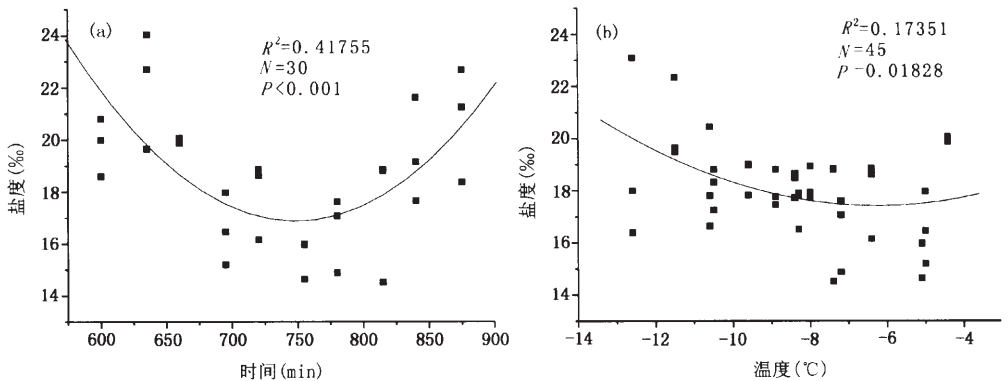


图 3 模拟海冰盐度与时间 (a)和温度(b)之间的关系

Fig.3 Relationships between the salinity of simulated sea ice and time intervals (a) and temperature (b)

### 2.4 二次成冰脱盐及离心脱盐

对部分咸水冰样融水和自然海冰融水的二次成冰后,盐度平均下降 56.4%,其中海冰融水盐度降至 0.4‰~2.0‰之间(图4(a)),大部分已接近和达到淡水标准。可见,近岸海冰经过长时间反复冻融,盐度大大降低。

海冰中的盐分主要存在于来不及从冰晶中析出的盐泡中。在离心作用下,比重较大的盐泡从冰晶中脱离出来,达到脱盐效果。室内离心实验结果表明,脱盐率在 20%~50%之

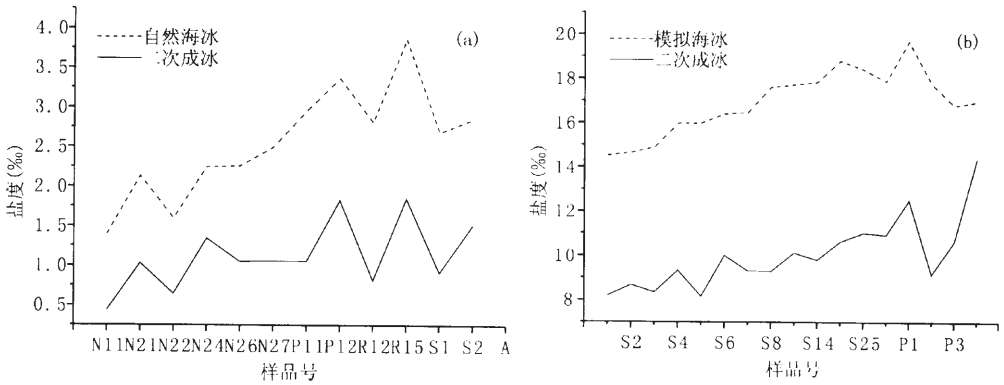


图 4 二次成冰后自然海冰 (a)和模拟海冰 (b)盐度变化

Fig.4 Variation in salinity of natural sea ice and simulated sea ice before and after refreezing

表 2 模拟海冰离心后的盐度变化

Table 2 Variation in salinity of simulated sea ice after being centrifuged

| 样品号 | 原始盐度 (‰) | 离心后盐度 (‰) | 脱盐率 (%) |
|-----|----------|-----------|---------|
| A1  | 18.706   | 9.047     | 51.6    |
| A2  | 18.396   | 8.460     | 54.0    |
| B1  | 19.514   | 9.933     | 49.1    |
| B2  | 19.926   | 16.800    | 15.7    |
| B3  | 19.367   | 12.547    | 35.2    |
| B4  | 18.586   | 12.493    | 32.8    |
| C1  | 17.012   | 8.768     | 48.5    |
| C2  | 16.150   | 9.427     | 41.6    |
| C3  | 18.122   | 13.410    | 26.0    |
| C4  | 16.150   | 14.992    | 7.2     |
| D1  | 17.860   | 11.192    | 37.3    |
| D2  | 16.898   | 13.400    | 20.7    |
| D3  | 17.754   | 11.192    | 37.0    |
| D4  | 16.722   | 11.027    | 34.1    |

间 (表 2)。在低温环境下，海冰破碎后，其盐泡暴露在外，经过离心作用，可将其降至更低水平。

### 3 讨论

#### 3.1 海冰盐度

盐度是海冰的一种特性，取决于其形成条件和环境，包括冻结前海水的盐度、结冰速度和成冰的时间长短 (即“冰龄”)。海水的盐度越高，所形成的冰的盐度也越高，反之亦然。我国北方海域一方面纬度偏高，另一方面受大陆的影响明显和受洋流影响较少，因而海水的盐度较同纬度地区的海水盐度低。与其它我国海区相比，渤海海水的盐度最低，冬季其盐度一般在 28‰~30‰之间，其中辽东湾为 29‰~30‰，渤海湾为 26‰~29‰，莱州湾为 27‰~28‰，黄海北部为 29‰~31‰。而且，距岸较远的中央部分的盐度较高 (可达 31‰以上)，近岸河口处海水的盐度较低 (常在 27‰以下)。海水的这种低盐特性为其结冰创造了自然条件。根据海冰调查的盐度资料，渤海海冰盐度的平均值范围在 2‰~13‰。

其中,渤海湾海冰盐度最低,黄海北部最高;在同一海区,远离海岸的海冰较近岸处海冰的盐度大;固定冰的盐度小于浮冰的盐度(表3)。

表3 我国海冰的盐度<sup>[9]</sup>

Table 3 The salinity of sea ice in China

| 海 区   | 平均(‰) | 范围(‰)       | 资料个数 | 时间      |
|-------|-------|-------------|------|---------|
| 辽 东 湾 | 9.70  | 6.36~14.49  | 9    | 1975-01 |
|       | 7.25  | 6.25~13.80  | 6    | 1975-02 |
|       | 7.38  | 6.42~9.54   | 5    | 1976-01 |
|       | 7.23  | 4.56~14.85  | 14   | 1976-02 |
|       | 8.83  | 4.54~16.76  | 15   | 1977-01 |
|       | 5.75  | 2.20~10.26  | 11   | 1977-02 |
|       | 5.47  | 4.06~6.67   | 9    | 1978-01 |
|       | 7.68  | 6.18~11.44  | 12   | 1978-02 |
|       | 10.98 | 8.38~16.86  | 16   | 1979-01 |
|       | 6.97  | 2.74~16.55  | 12   | 1979-02 |
|       | 10.90 | 6.58~14.96  | 9    | 1980-01 |
| 近 岸   | 11.91 | 6.49~15.97  | 12   | 1980-02 |
|       | 4.84  | 1.67~12.85  | 13   | 1971-01 |
|       | 6.03  | 1.87~15.37  | 9    | 1971-01 |
| 渤 海 湾 | 5.04  | 1.69~12.12  | 11   | 1971-02 |
|       | 11.01 | 8.69~13.22  | 3    | 1977-01 |
| 莱州湾   | 5.67  |             | 2    | 1979-02 |
|       | 4.29  | 1.91~9.61   | 5    | 1972-01 |
| 黄 海   | 4.57  | 3.73~5.93   | 4    | 1977-02 |
|       | 12.18 | 11.15~13.73 | 5    | 1977-01 |
| 北 部   | 12.99 |             | 7    | 1980-02 |
|       | 9.12  | 3.55~13.96  | 5    | 1970-12 |
|       | 7.04  | 1.53~16.46  | 10   | 1971-01 |
| 近 岸   | 6.47  | 1.87~13.21  | 13   | 1971-02 |

海冰形成时的气温越低,冻结速度就越快,冰层厚度的增长也越快,盐分来不及析出,盐度相应就大。通常,新形成海冰的盐度多在海水盐度的1/6~1/4。在海冰表层,与空气直接接触,冻结速度快,卤水不易排出。随着冰厚度的增加,冰的生长变缓慢,并且冰针具有规则地垂直定向排列,卤水很容易排出<sup>[4]</sup>。因此,盐度在冰层中的分布是由上层向下层递减。但是表层融化的速率也快,因而出现冻融反复使卤水向下析出,导致一些海区海冰盐度随厚度的增加出现各种变化,如辽东湾,海冰盐度由上而下呈“C”形<sup>[9]</sup>,波罗的海海冰盐度出现“S”形或更加复杂<sup>[10,11]</sup>。冰的盐度还与冰龄有关,一般情况下,冰龄越长,冰的盐度越小。此外,融化之前的腐冰盐度都比较低,因而,在渤海海区1月份海冰的盐度较2月份的大(表3)。

### 3.2 海冰的可利用价值

我国北方沿海地区是多数大河流的下游地区,由于河流提供的淡水资源逐年减少,人水矛盾十分突出。因此,开发海冰可大大缓解这些地区的人水矛盾。由上所述,海冰的盐度已大大低于海水的盐度,接近淡水,如果将海冰融水二次成冰或海冰粉碎后进行离心脱盐,其盐度可达到或接近淡水的盐度指标。这正是海冰作为我国北方重要的淡水资源开发的科学基础。渤海海冰作为淡水资源的利用主要在农业灌溉和城市清洁及工业用水等方面得以体现。

### 3.2.1 农业灌溉的应用

随着生产条件的改善和科学技术的发展,利用咸水灌溉农田,是扩大水资源比较经济有效的办法。环渤海地区缺水问题由来已久,尤其春旱非常严重。如果能够利用海冰融水的低矿化度特性,将其作为农业灌溉用水,能够解决该地区缺水问题。

在一般农业措施情况下,使用盐度大于2‰的水进行灌溉,对作物生长和产量产生影响的程度主要与咸水本身碱度(pH值),以及土壤类型、作物种类及其耐盐度有关。碱度是灌溉水的重要水质标准。一般而言,大部分栽培作物对pH值的适应范围在4~9之间,最佳范围为5~8.5<sup>[10,11]</sup>。据测定,渤海海水和海冰融水的pH值在6.89~6.73之间,故就其pH值而言,海冰融水作为灌溉用水是合适的。

研究表明,灌溉水中含盐量高于2‰时,就会引起土壤层一定程度的积盐。根据对北京郊区的试验结果<sup>[13]</sup>,利用咸水(1.3‰~6.0‰)灌溉后,土壤耕作层(0~20cm)的盐分含量由灌溉前的0.053‰~0.127%增加到0.061‰~0.233%。我国黄淮海地区作物品种抗盐性较强,微咸水灌溉引起的土壤耕作层的盐分含量,适合这些作物的幼苗期和生育盛期容许盐分含量<sup>[12,13]</sup>。因此,盐度为2.0‰~5.0‰的海冰融水可作为这些地区农田灌溉用水。

黄淮海平原在干旱年份(或季节),作物缺水是主要矛盾,用咸水灌溉比不灌溉显著增产。1980年至1981年在南皮试验田,对小麦产量的对比观测结果<sup>[12]</sup>表明,未灌溉的小麦严重受旱,产量仅195kg/hm<sup>2</sup>,而用咸水灌溉的小麦试验田,小麦产量为945~1950kg/hm<sup>2</sup>,两者相差5~10倍。当然,作物产量也随咸水盐度增高而降低。对于海冰,盐分以高比重盐泡形式存在于其中,在人工或机械开采破碎和搬运震动的情况下,其盐度有所降低。如果采取离心脱盐等措施,海冰盐度将大幅度降低。据此,海冰在规模化采集、搬运的条件下,其融水作为灌溉用水,与一般农用淡水相比,对作物产量的减产作用很低。

### 3.2.2 城市清洁与工业用水

随着经济的发展,特别是城市化的快速推进,清洁与工业用水在某一地区的总用水量所占比例将会不断增高,解决工业水源问题也就成为一个日益严峻的问题<sup>[14]</sup>。海冰融水可作为城市清洁用水,如冲刷、冲洗路面和清洗建筑物等环卫工作用水。沿海城市还可以将海冰融水,甚至海水直接用作工业用水。工业用水按其作用,可分为冷却用水、空调用水、产品用水(或称工艺用水)以及其它用水。其中冷却用水和空调用水在使用过程中一般不与产品和原料接触,对水质要求不高,使用之后水质几乎不被污染,可以循环使用。而且,冷却用水在工业用水中占主要部分,一个工业发达的地区,冷却用水量可占工业总用水量的70%左右。但是,海冰融水在使用过程中对生产设备的腐蚀作用,以及使用之后咸水的处理等一些问题,还需要进一步研究。

## 4 结论

根据实验结果的分析 and 讨论,初步得出以下几点结论。

①海冰在形成过程中,将各种各样的离子浓缩成盐卤而排出冰体进入海水,致使冰体总盐度大大降低。在渤海湾调查冰区,海冰盐度在1.4‰至4.0‰之间,平均为2.64‰,远低于海水的盐度;

②若对海冰融水再成冰,其盐度降低幅度为40%~70%,降低到0.5‰~2.0‰,其盐度接近淡水;由于海冰中盐分主要以盐泡形式存在于冰晶之间,经破碎(粉碎)离心后,海冰盐度将下降30%~50%。因此,通过使用耗能较少的简单工艺能够使海冰盐度大大降低而接近淡水,这在技术上是可行的;

③海冰作为淡水资源,其主要限制因子是海冰融水的盐度和碱度。根据我国北方沿海地区严重缺水状况,以及该区土壤特性和主要作物的耐盐性,渤海海冰融水的盐度和碱度

都在该区作物生长的容许范围内,可直接用于灌溉农田。同时,渤海海冰融水也可作为城市清洁(环境卫生)用水和一些工矿企业设备冷却用水;

(4)开发渤海海冰作为淡水资源将缓解北方沿海地区淡水短缺矛盾,增加这一地区的淡水储备能力,减缓依赖南水北调程度等,具有重要的实践价值和很高的经济效益和社会效益。至于如何在低耗能条件下,开采、搬运和储存海冰等有关工艺性和生产性问题,目前正在进行有关试验和可行性论证。

#### 参考文献:

- [1] 贾先斌,等.自然冷资源的开发利用[J].自然资源学报,1995,10(2):181~189.
- [2] 孙湘平,姚静娴.中国沿岸海洋水文气象概况[M].北京:科学出版社,1981.63~70.
- [3] 张方俭.我国的海冰[M].北京:海洋出版社,1986.109~113.
- [4] 丁德文.工程海冰学概论[M].北京:海洋出版社,1999.1~227.
- [5] 刘钦政,白珊,吴辉斌.中国海冰研究[J].海洋预报,1998,15:8~13.
- [6] 隋吉学.作用于斜坡结构物上海冰荷载的三维计算[J].海洋环境科学,1997,1:15~19.
- [7] Petit B, Norro A. Seasonal evolution of sea ice and oceanic heat flux in the Weddell Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2000,27: 37~52.
- [8] Omstedt A, Nyberg L. Response of Baltic Sea ice to seasonal, interannual forcing and climate change[J]. *Tellus*,1996, 48A: 644~622.
- [9] Høyland K V, Sveinung L. Measurements of temperature distribution, consolidation and morphology of a first-year sea ice ridge[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 29:59~74.
- [10] 沈振荣,贺伟程.中国农业用水的评价、存在问题及解决途径[J].自然资源学报,1996,11(3):221~230.
- [11] 农牧渔业部环境保护科研监测所.灌溉水质标准研究[M].北京:农业出版社,1985.
- [12] 施成熙,粟玉崇.农业水文学[M].北京:农业出版社,1984.
- [13] 刘昌明,魏忠义.华北平原农业水文及水资源[M].北京:科学出版社,1989.200~205.
- [14] 任光照,杨继孚,黄永基,等.城市用水[M].北京:水利电力出版社,1989.2~6.

## The desalinization of Bohai sea ice and its use value as fresh water resource

SHI Pei-jun, HA Si, YUAN Yi, ZHOU Jun-hua, XIE Feng

(Institute of Resources Science, Beijing Normal University; Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The problem of water deficiency is serious along the coastal areas of North China, but there are a large scope of sea ice in the Bohai Sea and the northern part of the Huanghai Sea. Salt separation from sea ice in freezing process results in lower salinity in sea ice, which may become a resolution to the water shortage problem of these areas. According to on-the-spot investigation and indoor experiments of seawater freezing process, this paper sets forth the salt content change of the ice in the Bohai Sea, and the seawater freezing and desalinization process. Then, it analyses the possibility of man-made desalinization of sea ice by using some methods, including refreezing process and centrifugal desalinization. Finally, the use value of sea ice as fresh water is discussed. The results show that:

(1)The salinity of sea ice in the investigated area in Bohai Gulf ranges from 1.4‰ to 4.0‰,

with an average of 2.64‰, far less than that of sea water.

②)The salinity of refreezed melting sea water decreases from 40‰ to 70‰, or only being 0.5‰-2.0‰, close to the salinity of freshwater. Since the salt of sea ice is among the ice-crystal in the form of salt-bubble, the salinity of sea ice will decrease by 30%~50% after being crushed into pieces, so it is feasible that the salinity of melting sea water ice will decrease remarkably by simple processing.

③)Whether sea ice can be used as freshwater depends on the salinity and alkalinity of the thawed sea ice. Considering the fact that water is deficient in the coastal areas of North China, and the property of soil and salt-resistibility of crops, as well as the salinity of thawed sea ice are in the sufferance range of growing crop, it can be applied to irrigation directly. In addition, the thawed sea ice has many other functions, such as city sanitation water, cooling water of metallurgy and so on.

④)As freshwater resources, the exploitation of sea ice of Bohai Gulf with massive reserves will be quite promising. The exploitation of sea ice has great economic and social benefits on alleviating the serious water scarcity problem in North China, increasing the reserve power of freshwater and lightening the degree of relying on Water Transfer from South to North Project.

**Key words:** sea ice; water resource; salinity; Bohai