

离心转速对渤海灰白冰脱盐作用的实验研究

陈伟斌¹, 徐学仁¹, 周传光¹

(1. 国家海洋环境监测中心 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 通过实验室离心实验, 研究了离心转速对渤海灰白冰脱盐、脱盐效果以及主要超标水质参数的影响. 实验结果表明, 在实验条件相同的情况下, 离心转速的变化对灰白冰的脱盐、脱盐效果均有显著影响. 离心转速达到 2 000 r/min 左右时, 脱盐冰的全盐量基本降到标准要求. 实验中, 灰白冰的离心脱盐率保持在较高的水平, 一般可达 80% ~ 90% 以上, 在 3 000 ~ 4 000 r/min 离心转速时, 渤海灰白冰脱盐率最大, 可达到 90.96%. 离心转速的变化对灰白冰中主要超标物质的去除有不同程度的影响, 其中硫酸盐含量变化幅度最大, 下降了 73.19% ~ 96.52%; 盐度也有较大程度的降低, 但降低幅度小于硫酸盐, 降幅在 71.86% ~ 93.55% 之间. pH 值没有发生恶化, 保持在 7.5 左右. 因此, 离心转速是渤海灰白冰离心脱盐过程中的主要控制性因子之一. 渤海灰白冰经过实验室离心脱盐后, 全盐量等各项水质指标均可达到工农业生产和人们生活用水的指标要求.

关键词: 灰白冰; 离心转速; 脱盐; 渤海

中图分类号: P731.15

文献标识码: A

文章编号: 0254-4193(2004)01-0025-08

1 引言

多年来人们在气象对海冰的影响^[1~9]和海冰对人类海洋活动的危害^[10~15]等方面研究较多, 但在把海冰直接淡化后作为淡水资源利用方面却研究很少. 脱盐是海冰淡化过程中的基本步骤, 而且在海冰资源开发利用中占有重要地位. 史培军等^[16]研究发现, 在渤海海域虽然有数量巨大的海冰(常冰年约 $10.38 \times 10^9 \text{ m}^3$), 但因含盐量有 2 项指标超过地表水标准^[17](氯化物 $4\ 143 \text{ mg/dm}^3$ 、硫酸盐 576 mg/dm^3), 又缺乏相关的脱盐技术, 使其无法用于解决环渤海地区的淡水资源匮乏问题. 同时渤海庞大冰量的海冰较之海水有很低的含盐量($3 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3}$)^[18], 这一自然条件又为低成本海冰淡化利用——新增淡水水源, 提供了一个机会. 从目

收稿日期: 2003-04-03; 修订日期: 2003-07-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40246027); 国家十五“863”资助项目“渤海海冰作为淡水资源的可行性研究”.

作者简介: 陈伟斌(1961—), 男, 上海市人, 研究员, 硕士, 现主要从事海冰淡化利用、海冰工程灾害防治等与海冰有关的研究. E-mail: cw_b@nmenc.gov.cn

前的研究结果来看, 作为海冰中盐分积存地的卤水与淡水结晶的冰晶体有被分离淡化的可能, 其中运用对水质无污染的物理脱盐方法分离冰晶与卤水应重点给予考虑. 灰白冰在渤海具有分布范围广^[19]、厚度适中、冰结构特征均匀等特点, 是淡化利用的理想资源. 本文着重研究了在其他离心条件相同情况下, 不同离心转速对灰白冰脱盐效果的影响, 以及在不同转速条件下, 其主要超标水质参数的变化趋势, 为深入探讨离心技术对海冰脱盐的影响提供依据.

2 样品采集和处理

2.1 实验冰采集与保存

实验冰坯选用 2002 年 1 月 28 日在长兴岛北海海面采集的灰白冰, 采样区距岸边约 500 m. 采样海区冰况呈现较大范围的重叠和堆积, 并伴有岸边冰脊底部搁浅现象. 采样区由大量辽东湾北部、东北部漂移来的流冰形成冰场主体冰量, 且冰场存在一定的不稳定性. 将本地生灰白冰, 用电动链锯切割成 15 cm × 15 cm × 冰厚的初级冰坯若干, 捞出水面用干净的塑料袋分别单独封装, 并按冰的自然状态冰-气界面向上、冰-水界面向下放入低温冰柜内, 在 -15 °C 以下保存.

2.2 实验样品处理

实验冰样: 实验前把采集的初级冰坯从冰柜中取出, 在低温实验室内将冰坯水平方向上的 4 个面去掉 2.5 cm 厚, 把剩余的 10 cm × 10 cm 冰块破碎为直径 0.6 cm 以下的冰粒, 充分混合后装入塑料盒内, 作为离心实验样品.

3 离心脱盐原理与实验方法

3.1 离心脱盐的基本原理

渤海海冰是由多边形的冰晶体、卤水胞、汽泡和少量固体杂质组成, 其结构特点是不含盐分的冰晶体, 按晶架结构紧密的排列在一起, 卤胞由两个或多个晶体晶壁之间充满饱和卤水的空间构成. 海冰中这种液-固两相共生的混合体结构奠定了海冰离心脱盐的基础.

本文中的离心脱盐基本着眼点, 就是通过离心运动对海冰混合体施加一个外力. 通过离心使冰内卤胞中的卤水和冰晶体之间产生受力差, 卤水所受离心力大于其附着在冰表面的黏性附着力和卤胞管中卤水表面张力之和, 形成冰中卤水的离心移动. 通过一定离心时间的连续施力和对冰晶体离心运动的限制, 达到卤水与冰晶体的分离.

3.2 离心脱盐实验方法

将制备好的破碎样品冰冰温恒定在 $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右; 实验样品量一般控制在 130~150 g; 实验环境温度控制在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右; 实验过程中不加任何其他化学试剂, 然后做离心脱盐实验. 称取海冰样品, 装入改装后的 LD4-2 型离心机离心管内; 把离心时间控制为 2, 4, 8, 15 min; 把离心转速控制为 500, 1 000, 2 000, 3 000, 4 000 r/min, 分别做离心脱盐的实验, 保留冰晶体, 去除冰中卤水. 脱盐后再复称一次冰样品重量. 最后将离心脱盐后的冰放入塑料瓶中融化, 测全盐量、盐度、电导率、硫酸盐、pH 值.

3.3 主要超标水质参数测定方法

全盐量根据国家环境保护总局标准 HJ/T51-1999 规定方法测定. 硫酸盐采用硫酸钡重量法测定. 盐度、电导率、pH 值采用 YSI556 仪器法测定.

水质评价标准选用农田灌溉水质标准 GB 5084-85, 地面水环境质量标准 GB 3838-88, 生活饮用水卫生标准 GB 5749-85.

3.4 脱盐率与单位离心转速脱盐率计算方法

脱盐率计算方法:

$$dr_i = (ts - ts_i) / ts \times 100\% \quad (i = 1, \dots, n),$$

式中, dr_i 为每分钟 i 转时的脱盐率; ts 为脱盐前的海冰样品全盐量; ts_i 为脱盐后的海冰样品全盐量.

单位离心转速脱盐率计算方法:

$$du_{(n)} = \Delta dr / \Delta Rs,$$

式中, $du_{(n)}$ 为每分钟 n 转时的单位转速脱盐率; Δdr 为 n 与 $n-1$ 转的脱盐率差, $\Delta dr = (dr_{(n)} - dr_{(n-1)})$, $dr_{(n)}$ 为每分钟 n 转时的脱盐率, $dr_{(n-1)}$ 为每分钟 $n-1$ 转时的脱盐率; ΔRs 为 n 与 $n-1$ 转的转速差; $\Delta Rs = (Rs_{(n)} - Rs_{(n-1)})$, $Rs_{(n)}$ 为每分钟 n 转时的转速, $Rs_{(n-1)}$ 为每分钟 $n-1$ 转时的转速. 本文将单位离心转速脱盐率用分段平均单位转速脱盐率 $\overline{d\mu}$ 表达, 其离心转速分为 $i (i = 1, \dots, 5)$, 则 $\overline{d\mu}_i = (dr_i - dr_{i-1}) / (Rs_i - Rs_{i-1})$.

4 结果和分析

4.1 不同离心转速对灰白冰脱盐和脱盐效果的影响

4.1.1 对脱盐的影响

全盐量和电导率两种指标均表明离心转速增加对灰白冰的脱盐有显著的促进作用(见图 1, 2), 结果十分吻合. 在 1 000 r/min 离心转速下, 全盐量和电导率值较 500 r/min 时有一个较大的降低幅度, 降低幅度在 18% ~ 42% 之间. 当增加离心转速至 2 000 r/min 时, 脱盐量明显加大, 全盐量和电导率的值比 500 r/min 低 32% ~ 62%. 即使与 1 000 r/min 离心转速情况比较, 其降幅也达 11.5% ~ 41.5%. 当离心转速增至 3 000 r/min 时脱盐量进一步加大, 全盐量和电导率的值比 500 r/min 低 36% ~ 68%, 但降幅开始快速减缓. 当离心转速增至 4 000 r/min 时脱盐量更大, 全盐量和电导率的值与 500 r/min 比较, 其降幅已达 38% ~ 71%, 降幅增量则趋于稳定. 随着离心转速的增加, 灰白冰的脱盐达标所需时间有缩短的趋势, 而且由图 1, 2 可见在 15 min 时间内随着离心时间的延长, 不同离心转速下脱盐后冰的全盐量和电导率趋于一个稳定值(全盐量 0.5 左右, 电导率 1.0 左右).

4.1.2 对脱盐效果的影响

实验结果表明(见表 1), 相同离心时间情况下, 在离心转速 500 r/min 以下时灰白冰的脱盐率已达到最高增长, 脱盐效果突出, 说明此时离心转速在克服冰中卤水与冰晶黏性附着力和表面张力方面的作用得到最大发挥. 在离心转速超过 500 r/min 后随着离心转速增加脱盐率逐步增大; 但相同离心时间单位离心转速脱盐率 $d\mu$ (这里用分段平均单位转速脱盐率 $\overline{d\mu}$ 代替) 却随着离心转速的增加迅速减少到一个很低的水平. 在实验时间段内, 1 000 r/min 离心转速相对于 500 r/min 离心转速, 其脱盐率增加较显著达 3.01% ~ 7.83%; $\overline{d\mu}$ 的下降速度更是非常显著, 达 0.128 92% ~ 0.163 06%. 在 2 000 r/min 离心转速时, 相对于 1 000 r/min 离心转速, 其脱盐率增加幅度减少为 0.19% ~ 6.23%; 然而 $\overline{d\mu}$ 的下降速度却大幅度趋缓, 为 0.005 82% ~ 0.012 05%. 在 3 000 r/min 离心转速时, 相对于 2 000 r/min 离心转速, 其脱盐率增

加幅度已大幅减少为 0.21%~4.22%; 同时 $\overline{d\mu}$ 的下降速度进一步趋缓, 为 0.0%~0.002 62%。在 4 000 r/min 离心转速时其脱盐率增加幅度基本与 3 000 r/min 离心转速相当, 为 0.20%~4.61%; $\overline{d\mu}$ 的下降速度为 0.000 39%~0.003 41%, 变化很小, 趋向零。实验说明离心脱盐时离心转速在达到 2 000~3 000 r/min 以上后, 通过进一步提升转速来克服冰中卤水黏性附着力和表面张力对卤水移动的制约, 已不是提高离心脱盐效果的最佳途径。可见在较低离心转速(500 r/min)时单位转速离心脱盐效果已达到很高的程度; 当离心转速达到 2 000~3 000 r/min 时, 对灰白冰的离心脱盐就可达到水质标准要求; 离心转速达到和超过 3 000 r/min 左右, 脱盐率的的增长与 $\overline{d\mu}$ 趋于稳定, 并且在一个较低的水平上, 此时若转速继续增加脱盐效果的提高已很不明显。

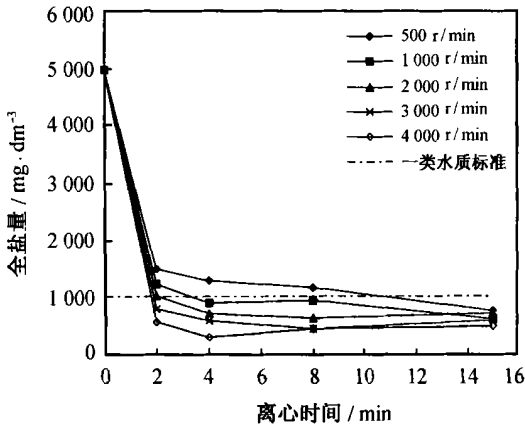


图 1 不同离心转速对灰白冰脱盐的影响(全盐量)

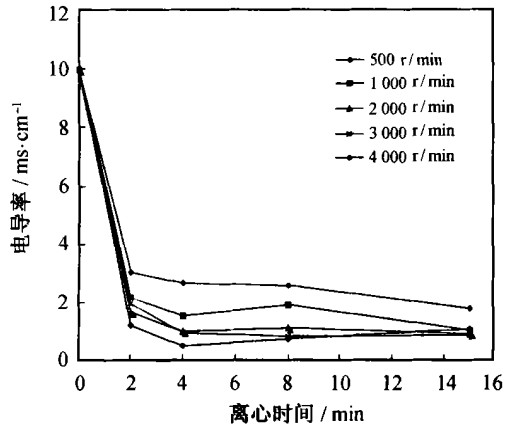


图 2 不同离心转速对灰白冰脱盐的影响(电导率)

表 1 离心转速对灰白冰脱盐效果的影响

I	转速 / r · min ⁻¹	离心 2 min		离心 4 min		离心 8 min		离心 15 min	
		脱盐率(%)	$\overline{d\mu}$	脱盐率(%)	$\overline{d\mu}$	脱盐率(%)	$\overline{d\mu}$	脱盐率(%)	$\overline{d\mu}$
1	500	69.88	0.139 76	74.10	0.148 20	—	—	84.54	0.169 08
2	1 000	75.30	0.010 84	81.93	0.015 66	80.92	—	87.55	0.006 02
3	2 000	79.52	0.004 22	85.54	0.003 61	87.15	0.006 23	87.74	0.000 19
4	3 000	83.74	0.004 22	87.95	0.002 41	90.76	0.003 61	87.95	0.000 21
5	4 000	88.35	0.004 61	90.96	0.003 01	90.96	0.000 20	89.96	0.002 01

4.2 离心转速对灰白冰主要超标水质参数的影响

4.2.1 对盐度的影响

由实验结果可以看出(图 1, 2), 在相同离心时间条件下, 灰白冰在离心转速增加时, 离心脱盐后盐度含量明显呈降低趋势, 盐度降低的绝对量在 4.01~5.22 之间(灰白冰自身盐度 5.58), 且总体趋势基本不受离心时间变化的影响(见图 3)。

渤海海冰冰融水作为淡水利用时水质超标的是全盐量、氯化物和硫酸盐^[17]。盐度在冰的水质评价中有很重要的作用, 其与冰中主要盐分的氯化物和总体盐分全盐量有很好的相关性

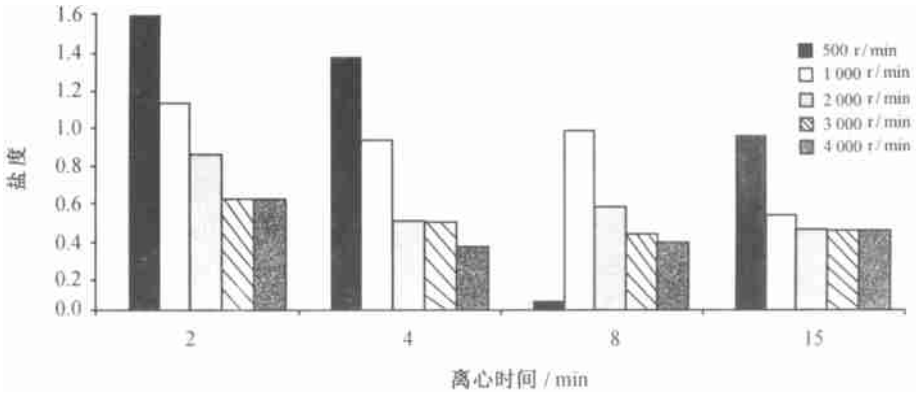


图3 离心转速对灰白冰盐度的影响

和平衡关系,当脱盐冰盐度较低时说明全盐量和氯化物也相应的较低.因此离心脱盐后,盐度的降低程度可反映出脱盐冰的全盐量和氯化物的脱盐达标效果.

4.2.2 对硫酸盐的影响

在相同离心时间条件下,灰白冰离心脱盐后硫酸盐含量大幅降低(灰白冰自身硫酸盐 448 mg/dm^3),降低幅度在2 min时降低了 $327.9 \sim 395.3 \text{ mg/dm}^3$ (73.19% ~ 88.24%),4 min时降低了 $334.4 \sim 425 \text{ mg/dm}^3$ (74.64% ~ 94.87%),8 min时降低了 $366.5 \sim 432.4 \text{ mg/dm}^3$ (81.81% ~ 96.52%,其中缺500 r/min时的硫酸盐),15 min时降低了 $378.9 \sim 432.4 \text{ mg/dm}^3$ (84.58% ~ 96.52%).下降趋势随转速变化明显,且有较好的规律性(图4).

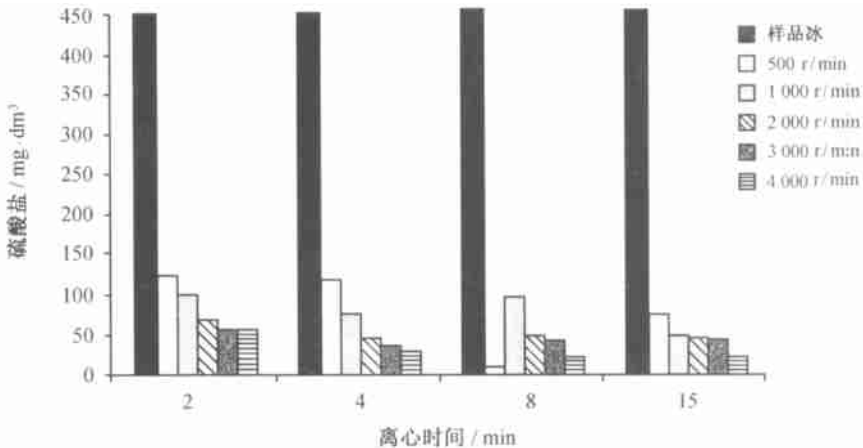


图4 离心转速对灰白冰硫酸盐的影响

硫酸盐是渤海海冰作为淡水利用时的另一个水质超标参数,其超标或含量偏高的结果是被人饮用后易产生腹泻,因此脱盐淡化中需予以高度重视.在离心转速由500 r/min增加到4000 r/min时,硫酸盐含量呈对数下降形态,这反映出离心转速在灰白冰脱盐中起重要作用,甚至是主要作用.实验结果,全部脱盐冰硫酸盐含量均大大低于地面水环境质量和生活饮用水卫生标准,呈现出良好的离心脱盐效果,并且说明通过离心较易达到将冰中硫酸盐与冰晶

体的分离.

4.3 离心转速对灰白冰脱盐后的冰融水 pH 值的影响

pH 值是灰白冰离心脱盐后能否作为淡水应用的重要指标之一. 它在不同离心转速条件下, 脱盐前后酸碱性变化不大(表 2, 灰白冰脱盐前 pH 值为 7.72), 均呈中性. 这可间接反映出通过海冰离心脱盐, 从冰中分离出的离出液主要成分特点为强酸强碱性离子. 因此, 在不同离心转速条件下, 灰白冰脱盐后水质的 pH 值没有发生恶化. 同时说明脱盐后冰融水(7.5 左右的 pH 值)对工农业生产用水和人们生活用水均是酸碱性适宜的水源(地面水环境质量标准和生活饮用水卫生标准中 pH 值为 6.5~8.5).

表 2 离心转速对灰白冰冰融水 pH 值的影响

转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	离心 2 min	离心 4 min	离心 8 min	离心 15 min
500	7.37	7.20	7.33	7.45
1 000	7.45	7.44	7.34	7.53
2 000	7.42	7.54	7.47	7.32
3 000	7.49	7.52	7.51	7.31
4 000	7.50	7.58	7.51	7.27

5 结语

实验结果表明, 在实验条件相同情况下, 离心转速在 2 000 r/min 以下时, 随着转速增加灰白冰脱盐效果提高明显(在 500 r/min 以内时效果尤其突出). 离心转速达到 2 000 r/min 左右时, 脱盐冰的全盐量基本降到农田灌溉水标准^[20]要求. 继续提高转速, 脱盐效果的提高幅度大大降低, 且越来越低. 这说明 2 000 r/min 左右的转速已基本可以达到使灰白冰冰中大部分卤水克服黏性附着力和表面张力产生移动, 直至与冰晶体分离的目的. 转速的进一步提升尤其是大幅度提升对提高脱盐效果的作用已不突出.

研究表明, 经过离心脱盐后渤海灰白冰脱盐率保持在较高的水平上, 一般可达 80%~90% 以上, 在 3 000~4 000 r/min 离心转速时, 脱盐率最大达到 90.96%. 渤海灰白冰经过实验室离心脱盐后, 盐分等各项水质指标均可达到农田灌溉水标准和地面水环境质量标准, 其水质完全可以满足工业生产、农业灌溉和城市居民生活用水的要求.

在相同实验控制条件下, 不同的脱盐率和不同的脱盐效果从一个侧面反映出, 目前实验控制的条件或参数, 还没有完全覆盖对离心脱盐产生影响的全部要素, 并且有些要素的影响有时还较大. 造成这种影响的原因可能有几种, 一种是卤胞破碎的方式不尽合理有部分卤胞未能被打开或打开的程度不理想, 不利于其中的卤水与冰晶体分离所致. 另一种是卤水在离心过程结束后残留在冰晶体表面细小的卤珠微粒引起. 第三种是目前采用的冰结构理论模型与渤海海冰的实际结构有一定的出入(尤其是冰中盐分存在形式方面), 不能完全支持本文的实验原理所致, 需要对渤海海冰结构的进一步深入研究予以修正.

在改变离心转速条件下, 脱盐灰白冰中主要超标水质参数含量受到不同程度的影响, 其中硫酸盐含量的变化幅度最大, 下降了 73.19%~96.52%, 全部脱盐冰硫酸盐含量均大大低于地面水环境质量标准和生活饮用水卫生标准; 盐度也下降了 71.86%~93.55%, 下降趋势随

转速变化明显, 呈现出良好的离心脱盐效果, 且有较好的规律性。

在不同离心转速条件下, 灰白冰脱盐后水质的 pH 值在 7.5 左右, 没有发生恶化. 说明渤海灰白冰脱盐后冰融水对工农业生产用水和人们生活用水均是酸碱性适中的优质水源, 同时也反映出增加离心转速脱盐, 对去除灰白冰中的超标物质有益, 对净化灰白冰水质非常有利。

参考文献:

- [1] 王仁树, 刘旭世, 张立琨. 渤海海冰的数值试验[J]. 海洋学报, 1984, 6(4): 572—580.
- [2] 陈伟斌. 辽东湾固定冰型态特征与成因初探[J]. 海洋环境科学, 1990, 9(4): 40—45.
- [3] MAYKUT G A. Energy exchange over young sea ice in the central Arctic[J]. J Geophys Res, 1978, 83(C7): 3 646—3 685.
- [4] CHEN Wei-bin, WANG Ren-shu, LIU Xu-shi, et al. A method of thermodynamic numerical of sea ice forecast in the Bohai Sea[A]. Proc of the 10th IAHR Symposium on Ice[C]. Espoo, Finland: Helsinki University Press, 1990. 2: 143—152.
- [5] LEMKE P, MANLEY T O. The seasonal variation of the mixed layer and the pycnocline under polar sea ice[J]. J Geophys Res, 1984, 89(C4): 6 494—6 504.
- [6] OMSTEDT A. Water cooling in the entrance of the Baltic Sea[J]. Tellus, 1987, 39(A): 254—265.
- [7] 吴辉碇, 白珊, 张占海. 海冰动力学过程的数值模拟[J]. 海洋学报, 1998, 20(2): 1—13.
- [8] 夏定武, 徐继祖. 有冰海域溢油运动数值模型研究[J]. 海洋学报, 1998, 20(1): 113—122.
- [9] 余加艾, 陈伟斌, 王仁树, 等. 海冰数值预报在海洋开发中的应用[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(1): 74—79.
- [10] 陈伟斌. 海冰与孤立桩柱相互作用数值模拟[J]. 海洋学报, 1996, 18(4): 114—119.
- [11] 隋吉学, 孟广琳, 李志军, 等. 环渤海海冰弯曲强度影响因素分析[J]. 海洋环境科学, 1996, 15(1): 73—76.
- [12] 金栋平, 陈予恕. 冰激结构振动的非线性分析[J]. 海洋学报, 1997, 19(2): 107—114.
- [13] 李洪升, 郑靖明, 岳前进. 冰和直立结构相互作用的静冰力可靠性分析[J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 106—112.
- [14] ARUNACHALAM V M, MUGGERRIDGE D B. Ice pressures on vertical and sloping structures through dimensional analysis and similarity theory[J]. Cold Regions Science and Technology, 1993. 21: 231—245.
- [15] 刘德辅, 杨永春, 王超, 等. 海冰荷载设计标准的不确定性及其联合概率分析[J]. 海洋学报, 1996, 18(5): 110—116.
- [16] 史培军, 范一大, 哈斯, 等. 利用 AVHRR 和 MODIS 数据测算海冰资源量[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 138—143.
- [17] 徐学仁, 陈伟斌, 刘现明, 等. 长兴岛沿岸海域海冰融化水水质状况[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(2): 33—36.
- [18] 杨国金. 海冰工程学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000. 266—270.
- [19] 丁德文, 等. 工程海冰学概论[M]. 北京: 海洋出版社, 1999. 91—117.
- [20] GB 5084—85, 农田灌溉水质标准[S].
- [21] GB 5749—85, 生活饮用水卫生标准[S].

Testing study on desalination role of the gray-white ice in the Bohai Sea by the centrifugal rotational speed

CHEN Wei-bin¹, XU Xue-ren¹, ZHOU Chuang-guang¹

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: Effect of centrifugal rotational speed on desalination and factors exceeded quality standard of gray-white ice in the Bohai Sea were studied by centrifugal experiments at the laboratory. The experimental results show that

the effect of rotational speed variance on the desalination and its efficiency are obvious under the same experiment condition. When the rotational speed arrived at 2 000 r/min, the total salt of the desalted ice decreased basically to the standard value. The rate of desalination of gray-white ice in the Bohai Sea maintained higher level and commonly surpassed 80% ~ 90%. When the centrifugal rotational speed was 3 000~ 4 000 r/min, the rate of desalination of gray-white ice in the Bohai Sea was maximum and its value was 90.96%. The removal of materials exceeded standard from gray-white ice was influenced in varying degrees by the variations in the centrifugal rotational speed. The sulfate content changed maximally and decreased by 73.19% ~ 96.52%. The salinity also more decreased and had less decreased range than sulfate, the range was 71.86% ~ 93.55%. pH value was not deteriorative after desalination and it maintained about 7.5. Therefore centrifugal rotational speed is one of major controlling parameters in the centrifugal desalting process of gray-white ice in the Bohai Sea. After gray-white ice in the Bohai Sea were desalted, such quality factors as salinity of desalted ice fulfil the needs of water for the industry and agriculture production and the people's living.

Key words: gray-white ice; centrifugal rotational speed; desalination; the Bohai Sea