

# 渤海海冰特征厚度分析\*

季顺迎 岳前进

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

**摘要** 通过海冰生消机理和数值试验, 讨论了渤海海冰特征厚度的存在条件; 对不同厚度的海冰表面温度、冰面热量收支、冰面下热传导和太阳辐射透射量进行了对比分析, 分析了渤海海冰向特征冰厚的动态演化过程; 在不同气温、风速、相对湿度和海洋热通量等气象和水文条件下, 对渤海特征冰厚进行了计算; 讨论了海冰生消的动态平衡过程, 分析了 1997/1998 年冬季辽东湾 JZ20-2 海域实测冰厚与特征冰厚的相互关系. 对渤海特征冰厚分析将有助于渤海海冰数值模拟工作的开展和对不同重现期设计冰厚的推算.

**关键词** 渤海 海冰 特征厚度 海洋热通量

**中图分类号**: P731.15

## 1 引言

在研究极区海冰对气候变化趋势的影响时人们提出了平衡冰厚的概念, 并将其作为海气相互作用的一种指标<sup>[1]</sup>. 在渤海 JZ20-2 海域海冰数值模拟中发现, 在一定的气象和水文条件下, 无论初始冰厚如何, 模拟冰厚总向一个特定值逼近. 通过其对气温、风速、相对湿度和海洋热通量的敏度分析, 发现该值与渤海海域的气象和水文特性有密切关系, 这里称其为特征冰厚. 通过对渤海海冰特征厚度分析, 可以深入理解海冰生消与气象、水文要素的相互关系, 有助于分析渤海海冰的生消规律, 解决一些诸如冰厚极值分布、疲劳冰力谱和危险冰情预警等工程问题.

## 2 特征冰厚的物理机制

海冰生消过程主要由其热力要素控制, 并可通过海冰热力模式进行数值模拟<sup>[2-4]</sup>. 海冰生消的热力因素主要包括冰盖上表面的太阳辐射、长波辐射、感热和潜热、冰盖内

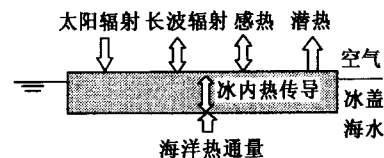


图1 海冰的热量收支示意图

本文于 2000-03-24 收到, 修改稿于 2000-05-30 收到.

\* 国家自然科学基金与中国海洋石油渤海公司联合资助重点项目(编号:59739170).

第一作者简介: 季顺迎, 男, 28 岁, 博士生, 从事渤海海冰数值模拟及其工程应用研究.

部的传导热以及冰盖下表面的海洋热通量(图 1). 以上诸热力要素共同作用导致冰盖内温度场的时空变化和海冰厚度的增减.

## 2.1 冰内温度场

冰盖内的热传导和扩散比较复杂,除了入射到冰盖内部的太阳辐射外,还受冰内卤水泡和杂质的影响.冰盖内热传导方程为<sup>[3]</sup>

$$\rho c(z, t) \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(z, t) \frac{\partial T_i}{\partial z} \right] + Q_{se} \tau_i \gamma_i e^{-\gamma_i z}, \quad (1)$$

式中,  $\rho c(z, t) = \rho_i c_i + \lambda S_i(z) \frac{1}{T_i^2}$ ;  $K(z, t) = k_i + \frac{\beta S_i(z)}{T_i}$ , 其中,  $\rho_i$ ,  $c_i$  和  $k_i$  分别为海冰的密度、比热和热传导系数,  $\lambda$  和  $\beta$  为常数,  $T_i$  和  $S_i(z)$  分别为冰温和冰面下深度  $z$  处的盐度;  $Q_{se}$  为冰面有效太阳辐射;  $\tau_i$  为太阳辐射在海冰表面的透射率;  $\gamma_i$  为海冰对太阳辐射的衰减系数. 通过有限差分法可以计算冰盖内的温度分布.

## 2.2 冰厚变化

计算冰厚时应同时考虑冰-气界面和冰-水界面的质量变化. 如果不考虑降水的影响, 在海冰上表面, 当表面冰温  $T_s > T_m$  时 ( $T_m$  为海冰融点), 冰盖表层热量收支总和  $\sum Q_s > 0$ , 冰盖吸收热量, 导致表面冰融化; 当  $T_s \leq T_m$  时, 通过冰内传导来调节冰盖热力平衡. 冰盖下表面的质量变化主要由冰内传热和海洋热通量来确定, 对于薄冰应同时考虑冰下太阳辐射的影响<sup>[4]</sup>. 综合考虑冰盖上、下表面的质量变化, 冰厚增长率<sup>[5]</sup>为

$$\frac{dh}{dt} = \left( \frac{dh}{dt} \right)_s + \left( \frac{dh}{dt} \right)_b, \quad (2)$$

式中,

$$\left( \frac{dh}{dt} \right)_s = \begin{cases} -\sum Q_s / \rho_i L_i & T_s > T_m, \\ 0 & T_s \leq T_m, \end{cases} \quad (3)$$

$$\left( \frac{dh}{dt} \right)_b = \left[ K_i \left( \frac{\partial T_i}{\partial z} \right)_b - Q_w - Q_{sb} \right] / \rho_i L_i, \quad (4)$$

其中  $h$  为冰盖厚度,  $L_i$  为海冰的融解潜热,  $Q_w$  和  $Q_{sb}$  分别为冰下海洋热通量和太阳辐射透射量, 它们在不同季节和海区是不同的<sup>[6]</sup>.

无论在海冰实际观测中还是在数值模拟中都存在这样一种现象: 在初冰期海冰厚度增长率较大, 但随着冰期延长, 冰厚增加, 冰厚增长速率不断降低. 由此可设想: 在一定的气象和水文条件下会不会存在一个冰厚, 它使海冰从外界吸收的热量与其散失的热量大小相等, 从而导致冰厚保持稳定.

由于表面冰温一般都要低于其冰点, 海冰生消主要在冰盖下表面进行<sup>[4]</sup>. 由式(4)可以看出, 当海洋热通量、太阳辐射透射量与冰内传热相平衡时, 海冰厚度将保持稳定, 这时称它为当时气象和水文条件下的特征冰厚.

## 3 渤海海冰特征厚度分析

从海冰生消机理上讲, 特征冰厚是存在的, 而为分析渤海特征冰厚与气象和水文要素的关系, 下面利用 1998 年 1 月 22 日在辽东湾 JZ20-2 平台上实测的气象和水文数据来对海冰厚

度进行数值模拟. 气温、风速、相对湿度和太阳辐射量见下页图2, 其日平均气温和风速分别为  $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $8.5\text{ cm/s}$ , 海洋热通量取为  $60\text{ W/m}^2$ [7].

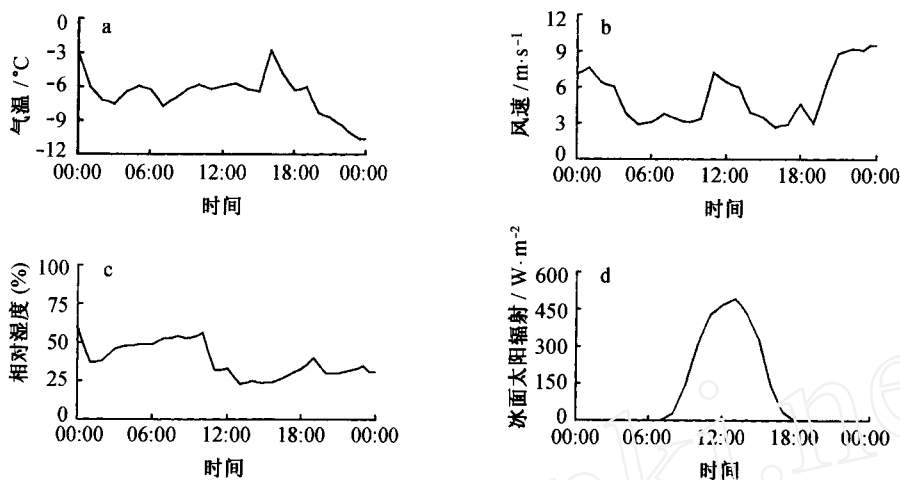


图2 1998年1月22日00:00至23日00:00实测气温、风速、相对湿度和太阳辐射

当初始冰厚分别取5, 10, 15和20 cm时, 模拟冰厚都向一个较稳定的数值逼近, 如图3所示. 当模拟时间达900 h后, 模拟冰厚都保持在8.0 cm左右, 也就是说, 当时的特征冰厚为8.0 cm. 由于1 d内的温度波动和太阳辐射的影响, 因此模拟冰厚呈上下波动的平衡状态. 由此可见, 海冰在生消过程中有一个向其稳定状态发展的趋势和保持这种稳定状态的性能.

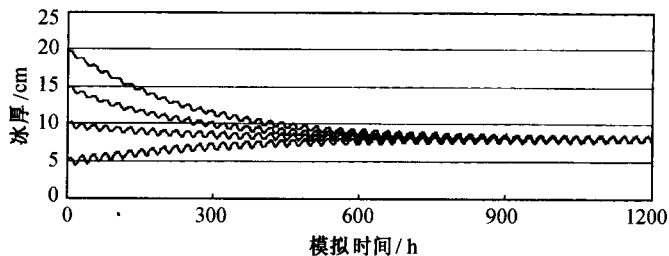


图3 1998年1月22日不同初始条件下海冰模拟厚度的变化趋势

不同冰厚条件下, 海冰表面温度、冰面热收支总量、冰底太阳辐射透射量、冰底向上传热、冰底热收支总量和冰厚变化速率等在24 h内的变化过程如图4所示, 日平均值列于表1. 由

表1 不同冰厚条件下热力要素日平均值对比

冰厚/cm	海洋热通量 $/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	冰底太阳辐射 透射量 $/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	冰底向上传热 $/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	冰底热收支总量 $/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	冰厚变化率 $/\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$
5	60.00	40.90	-102.69	-1.79	0.0513
10	60.00	38.02	-84.87	13.15	-0.3769
15	60.00	35.37	-66.39	28.98	-0.8306
20	60.00	32.91	-52.04	40.87	-0.1713

注: 海冰吸收热量为正值, 散失热量为负值; 冰厚增加为正值, 冰厚减小为负值.

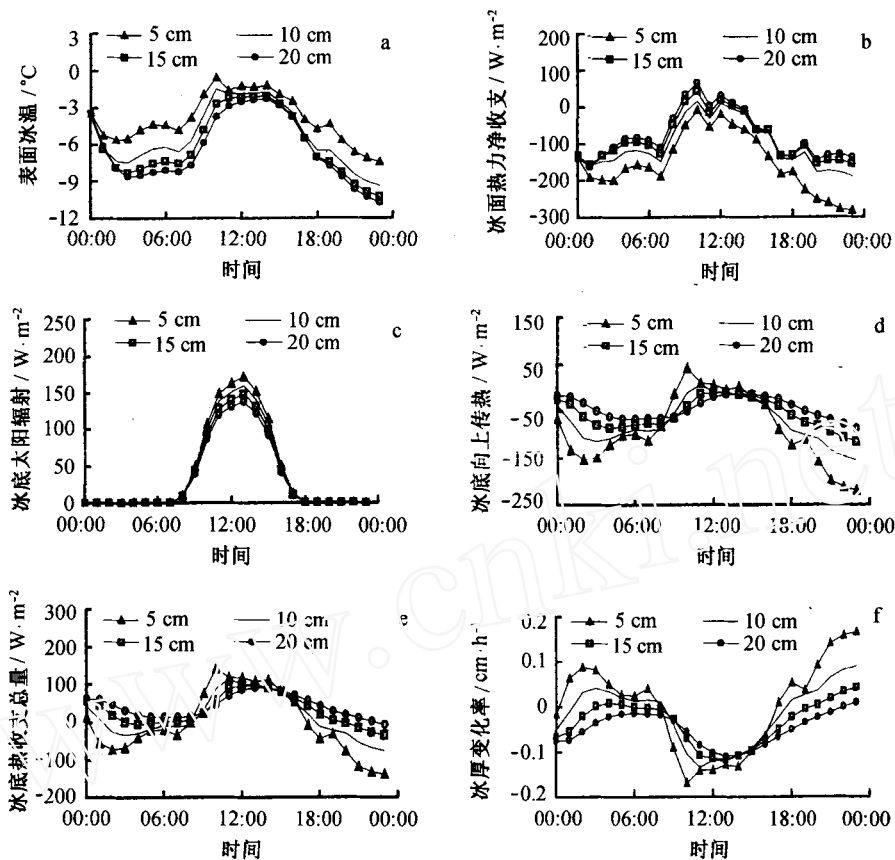


图4 1998年1月22日气象和水文条件下不同初始厚度时冰面热力收支和冰厚变化率

图4和表1可看出,在相同的气象和水文条件下,如果冰厚不同,表面冰温是不同的,从而冰面向大气散失的热量也就不同.海冰越厚,表面冰温越低,冰面散失热量也就越少.虽然透射到冰盖底面的太阳辐射量随冰厚的增加而减小,但冰盖底面因向上传热而散失的热量随着冰厚的增加而减小得更快,因此薄冰的生长速率要明显大于厚冰.这样,当初始冰厚大于特征冰厚时海冰发生消融,并向特征冰厚逼近;当初始冰厚小于特征冰厚时海冰不断增厚,也向特征冰厚逼近.由此可见,当外界气温降低、风速变大时,海冰不断增厚以阻止海水更多的热量散发出去;反之,当气温升高、风速减小时,海冰变薄直至消融,以使海水与外界进行充分的热量交换,甚至从外界吸收热量.

#### 4 不同气象和水文条件下的特征冰厚

渤海海冰的特征厚度是与气象和水文条件相对应的.这里对不同天气和水文条件下的海冰厚度进行模拟,得出与之对应的特征冰厚.水文条件的变化主要是对海洋热通量的影响,气象要素主要表现为风速、气温和相对湿度的变化.

分别取不同的海洋热通量、气温、风速和相对湿度对渤海特征冰厚进行了计算,部分结果分别绘于图5和列于表2.由图5和表2可看出,在不同的气象和水文条件下特征冰厚是不一

样的,气温越低,风速越大,相对湿度越高,海洋热通量越小,所对应的特征冰厚就越大.另外,当气温较高时,特征冰厚与风速并不成正比关系.这主要是由于风速增大到一定程度时冰面散失的潜热要小于冰面吸收的感热,从而使特征冰厚减小.由表2还可发现,随特征冰厚的增加,气象和水文要素对其影响越来越小.

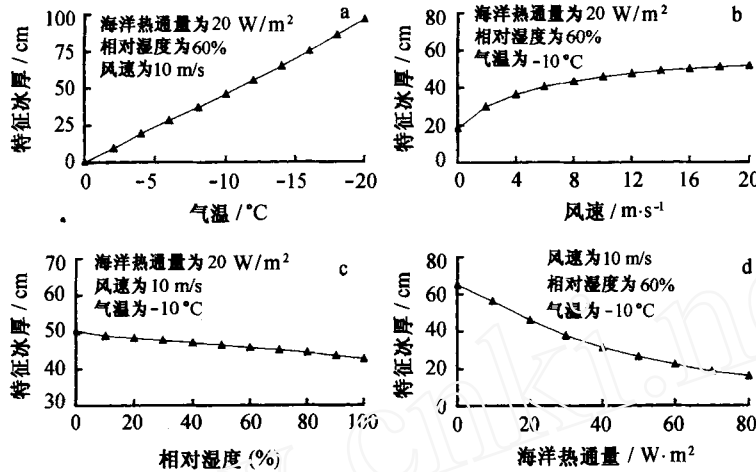


图5 不同天气和水文条件下的特征冰厚

表2 不同风速、气温、相对湿度和海洋热通量条件下的特征冰厚(cm)

风速/ $m \cdot s^{-1}$	相对湿度(%)	-5 °C			-10 °C			-15 °C		
		海洋热通量/ $W \cdot m^{-2}$			海洋热通量/ $W \cdot m^{-2}$			海洋热通量/ $W \cdot m^{-2}$		
		10	20	40	10	20	40	10	20	40
1	30	13.5	0.0	0.0	29.8	22.5	0.0	43.0	32.4	18.0
	60	0.0	0.0	0.0	26.4	18.3	0.0	40.1	30.7	14.6
	90	0.0	0.0	0.0	22.6	0.0	0.0	38.0	29.3	0.0
5	30	31.4	25.3	16.3	50.7	41.5	28.8	74.2	61.1	42.4
	60	25.6	19.2	8.8	47.8	38.6	25.8	72.6	59.4	40.6
	90	16.3	0.0	0.0	44.8	35.4	22.5	71.1	57.7	38.8
10	30	34.7	28.5	19.9	57.6	47.7	33.8	85.0	71.0	50.2
	60	30.7	24.0	15.2	56.2	45.8	31.4	84.5	70.0	48.7
	90	24.6	17.3	6.71	54.6	43.5	28.5	84.0	69.1	47.1
15	30	34.3	28.5	20.6	61.2	50.1	35.9	91.9	76.5	54.2
	60	32.3	25.6	16.9	60.6	49.6	34.1	91.6	76.3	53.1
	90	28.2	20.4	10.7	60.4	48.4	31.5	91.1	76.0	51.5

### 5 渤海冰厚随其特征冰厚的动态变化

海冰向特征冰厚的逼近过程是比较长的,一般需要30 d(见图3),而实际的气象和水文条件每时每刻都在变化,其所对应的特征冰厚也在不断变化,并呈现出一定的动态平衡特性,因

此渤海海冰生消是一个不断向其特征冰厚逼近的动态变化过程。

下面以 1997/1998 年辽东湾 JZ20-2 海域为例来对海冰生消与其特征冰厚的关系进行讨论。这里仍以 1 d 为一个计算单位对该冬季的特征冰厚进行计算,结果和实测冰厚如图 6 所示。

由图 6 可看出,海冰特征冰厚变化较为剧烈,不但特征冰厚经常明显高于实际冰厚,同时还存在许多特征冰厚为 0 cm 的情况。另外,还可发现,

在整个冰期的海冰生消过程中,实际冰厚不断向特征冰厚逼近的微妙关系。由此可见,特征冰厚能够揭示海冰生消与气象和水文要素的内在规律。

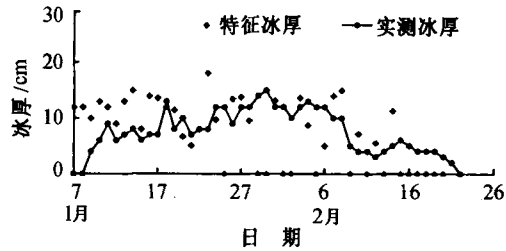


图 6 JZ20-2 海域 1997/1998 年度  
海冰厚度变化

## 6 结语

在对渤海海冰的数值模拟中发现存在一个与特定的气象和水文条件相适应的特征厚度。在 1998 年 1 月 22 日的气象和水文条件下,对海冰生消过程中的表面冰温、冰盖上下表面的热量收支进行了计算,分析了特征冰厚产生的物理机理。在不同气温、风速、相对湿度和海洋热通量等气象和水文条件下,对渤海特征冰厚进行了计算,同时发现并讨论了特征冰厚与风速的非正比例关系;讨论了海冰在生消过程中向特征冰厚的逼近时间;讨论了 1997/1998 年度辽东湾 JZ20-2 海域海冰实际冰厚与特征冰厚的关系。

本文工作得益于同国家海洋环境预报中心吴辉碇教授和中国海洋石油生产研究中心杨国金高工的有益讨论,在此深表谢意。

## 参考文献

- 1 王仁树. 渤海海冰的数值试验. 海洋学报, 1984, 6(4): 572~580
- 2 吴辉碇. 海冰的动力-热力过程的数学处理. 海洋与湖沼, 1991, 20(2): 321~327
- 3 多罗宁 Ю 著. 王宗山, 徐伯昌译. 海洋和大气的相互作用. 北京: 海洋出版社, 1991. 70~90
- 4 Parkinson C L, Washington W M. A large-scale numerical model of sea ice. J Geophysical Research, 1979, 84: 311~337
- 5 程 斌. 一维海冰热力模型的守恒型差分格式和数值模拟. 海洋通报, 1996, 15(4): 8~15
- 6 岳前进, 季顺迎, 苗文东, 等. 辽东湾冰期太阳辐射分析. 海洋与湖沼, 2000, 29(5)
- 7 季顺迎, 岳前进. 辽东湾冰期海洋热通量的确定与分析. 海洋通报. 2000, 19(2): 8~14
- 8 李桐魁. 渤海油田海冰管理系统的应用. 中国海上油气(工程), 1996, 8(4): 36~45
- 9 王可光, 吴辉碇, 王彩欣, 等. 渤海冰期的基本水文气象参量研究. 海洋通报, 1999, 18(2): 17~27

## Discussion on sea ice diagnostic thickness for the Bohai Sea

Ji Shunying,<sup>1</sup> Yue Qianjin<sup>1</sup>

1. *State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023*

**Abstract**—In the sea ice numerical simulation of the Bohai Sea, under the same meteorological and oceanographic conditions, the ice thickness always trends to a certain value, which can be called diagnostic thickness, although the initial thickness is different. Through the analysis of ice growth mechanism, the existence of diagnostic thickness is discussed. The ice temperature and the heat flux at ice-cover surface, the transmitted solar radiation and the heat flux at ice-cover bottom under different ice thicknesses are contrasted. The dynamic process and the approach time when the sea ice approaches the diagnostic thickness are discussed. Under different air temperatures, wind speeds, relative humidities and oceanic heat fluxes, the diagnostic thicknesses are calculated respectively. The relationship between the actual ice thickness and the diagnostic thickness in the winter of 1997/1998 of the Liaodong Gulf are analyzed. The study of the sea ice diagnostic thickness will be useful to the sea ice numerical simulation and the determination of the sea ice design parameters in the Bohai Sea.

**Key words** Bohai Sea, sea ice, diagnostic thickness, oceanic heat flux