

辽东湾冰期海洋热通量的确定与分析*

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 首先讨论了海洋热通量的计算方法, 并利用辽东湾JZ20-2海域定点观测的气象、水文和海冰数据, 对1997~1998年度的海洋热通量进行了数值计算。结果表明, 其值在初冰期最大, 可达 200Wm^{-2} 以上, 然后随着冰期的延长而逐渐减小, 在融冰期接近于0。最后, 讨论了气象和水文条件、海冰厚度和类型等因素对海洋热通量的影响。本文首次对辽东湾冰期的海洋热通量进行了确定, 并得到了其在整个冰期内的变化规律。

关键词 海冰 海洋热通量 数值模拟

引言

在冰区, 海洋热通量是指海水对海冰下表面的热量传递^[1]。它是海冰热力计算的基本参数, 是海冰数值模拟和预报的一个重要内容。从20世纪60年代海冰数值模式的建立以来, 对冰期海洋热通量的研究一直是人们比较关注的问题。

在对不同海域海冰研究过程中, 人们确定了一系列的海洋热通量。例如, Omstedt和Wattlauffer(1992)在北极东部进行的实验表明, 北极海洋热通量在 $0\sim 50\text{Wm}^{-2}$ 之间^[1]; Hibler和Bryan(1987)发现在Greenl和Nornegian海域的数值可达 350Wm^{-2} ^[2]; Lu(1987)在对东Greenland海域进行海冰模拟时, 分别选取25、150和 200Wm^{-2} 来对计算结果进行敏感性分析后, 最后在海冰数值模拟时也取用了 350Wm^{-2} ^[1]; Shirasawa(1997)确定的日本Saroma-ko滨海湖的海洋热通量的日变化在 $33\sim 75\text{Wm}^{-2}$ 之间^[3]; Perorich et al.(1989)通过在北极冰缘区的观测得到海洋热通量在 $7\sim 128\text{Wm}^{-2}$ 之间^[4]; 在我国渤海, 王仁树(1984)分别取0、50和 $100\text{Cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ (即0、24.19和 48.38Wm^{-2}), 对预报冰缘线进行了敏度分析, 并发现海洋热通量对其有明显影响^[5]; 王志联和吴辉碇(1994)以及程斌(1996)根据数值试验的结果选取常数 2Wm^{-2} 对渤海海冰进行了数值模拟^[6,7]。由此可见, 在不同海域海洋热通量的取值有很大的差异。另外, 即便是在同一海域, 冰期海洋热通量也有很强的时空变化。例如, Lu(1990)通过Greenland海域夏季海冰对海洋热通量的敏感性分析发现, 该海域冬季的海洋热通量要比夏季大, 北部海域的数值要比南部大^[8]。Liu(1998)在模拟气象要素对北极海冰的作用过程时, 在冰区内部取 2Wm^{-2} , 而在边缘冰区则是取 $20\sim 40\text{Wm}^{-2}$ ^[9]。

海洋热通量与海水的温度、盐度和速度等水文条件, 气温、风速等气象条件,

收稿日期: 1999-05-04

*国家自然科学基金与中国海洋石油渤海公司联合资助(批准号: 59739170)

1) Lu Qian-Ming. On Mesoscale Modeling of the Dynamics and Thermodynamics of Sea Ice, Technical University of Denmark, 1987

以及海冰的厚度、类型和粗糙度等海冰自身特征有着密切的关系。通过对以上诸参数的观测,可利用涡动法直接确定出海洋热通量^[10~12];另外,根据冰点和海水的温差,也可通过体积块法来进行计算^[13,14];然而,采用较广泛的则是剩余法,即由海冰下表面的热量平衡来确定海洋热通量^[1,3,15]。另外,通过海冰数值模拟的敏度分析,也可确定海洋热通量的取值范围^[5,8]。

在辽东湾JZ20-2平台上建立了海冰观测站,可对气温、风速等气象条件,水温、海流和盐度等水文要素,以及海冰的厚度、流速、类型和密集度等进行连续的同步观测。在此基础上,本文采用剩余法对辽东湾的海洋热通量进行了计算,并对其影响因素进行了讨论。

1 海洋热通量的确定方法

在海冰的生消过程中,冰水间的动量、热量和盐度传递相互耦合。根据傅立叶定律,并建立海冰边界层理论^[10,11],冰水界面处的热量传递为:

$$F_w = -k \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z=0} = \langle w'T' \rangle \quad (1)$$

式中 w' ——边界层上部竖直方向的脉动速度,它与海冰下界面的融解速度有关; T' ——海冰下表面温差扰动, $\langle \rangle$ 表示均值。Mcphee(1987)建立了 w' 同海水盐度的关系,并通过边界层内的盐度和温度平衡来进行计算^[10]。

海洋热通量与水温、冰点和冰面摩擦速度有密切关系,可用热传递系数 C_h (又称Stanton数)将它们联系起来^[13,14],即:

$$F_w = \rho_w c_p C_h u_* (T_w - T_m) \quad (2)$$

式中 ρ_w 和 c_p ——海水的密度和定压比热容; u_* ——摩擦流速; T_w 和 T_m ——水温和冰点,其中 T_m 是盐度 S 的函数($T_m = -0.0544 S$)。部分作者也将上式中的 u_* 用相对流速 u_w 来代替,则热传递系数 C_h 也应有相应的改变。

另外,根据海冰下界面处的能量平衡,海洋热通量可由冰下相变潜热与冰内热传导之差来确定,有:

$$F_w = -\rho_i L_i \left(\frac{dh_i}{dt} \right)_0 - F_c - Q_{sb} \quad (3)$$

式中 ρ_i 和 L_i ——分别为海冰的密度和潜热; k_i ——热传导系数; T_i ——冰温($^{\circ}\text{C}$); $\left(\frac{dh_i}{dt} \right)_0$ ——冰下厚度变化率; F_c 、 Q_{sb} ——分别为到达海冰下界面的冰内传导热和太阳辐射量。对于厚冰($h_i > 0.57\text{m}$),则不考虑 Q_{sb} 的影响,而在辽东湾海域,由于海冰较薄(通常 $h_i < 0.2\text{m}$), Q_{sb} 对冰下融解速率的影响非常显著。

2 辽东湾海洋热通量的确定

在辽东湾海域的JZ20-2平台上,对整个冰期内的气象、水文和海冰条件进行了观测,并选用剩余法对海洋热通量进行了计算。由于海洋热通量的确定是根据海冰生消的热量平衡来进行的,因此需要准确计算影响海冰生消的各热力要素,包括上表面的太阳辐射、长波辐射、对流传热和蒸发冷凝热,以及冰盖内部的热传导。

2.1 海冰的定点观测

为了对海冰的热力计算提供可靠的数据信息,也为海冰模拟结果的验证提供参考依据,需要对气象、水文和海冰条件进行准确详尽地观测。气象要素包括风速、气温、相对湿度以及大气压等,水文要素主要为流速、水温以及盐度等,海冰信息包括海冰厚度、流速、类型和密集度等。

为此,在辽东湾JZ20-2平台上建立了海冰定点观测站,通过气象站、海流计、雷达和摄像机等观测手段来对以上气象、水文和海冰要素进行同步观测。气象站和海流计分别每隔10和15min自动记录一次;通过雷达站可对该海域海冰的类型、密集度、漂移速度和运动轨迹等信息进行准确可靠的连续观测;冰厚的观测是通过安装在平台中层甲板上的摄像机来完成的。它是利用摄像机将冰盖在平台桩腿上的破碎过程输入到计算机内,再通过图像处理来获得冰盖厚度。

在风和流等动力要素的作用下,辽东湾海冰表现出强烈的动态特性,不断地破碎和漂移,使冰厚变化存在一定的间断性,而海冰模拟则是将海冰厚度视为连续变化。为使模拟值和实测值有一定的可比性,需作如下处理:将整个冰期分成若干个3~5d的时间段,在每个时间段内,没有强烈的动力作用,而周期性的潮流使海冰一直在JZ20-2海域往复漂移。这样,就将观测的海冰厚度近视为连续变化。

2.2 海洋热通量的计算

在选用剩余法进行海洋热通量的计算时,需要观测冰厚的变化率。对JZ20-2海域的冰厚测量每天进行4次,分别在08:00、11:00、14:00和17:00,因此,在进行计算时需选用不同时间段并对方程(3)积分,得:

$$F_w = \left(\frac{h_{i(2)} - h_{i(1)}}{\rho_i L_i} - \int_{t_1}^{t_2} F_c(t) + Q_{sb}(t) dt \right) / (t_2 - t_1) \quad (4)$$

式中 $h_{i(1)}$ 、 $h_{i(2)}$ —— t_1 和 t_2 时刻的冰厚; $F_c(t)$ 、 $Q_{sb}(t)$ —— 时间 t 的变化量。

选取1997~1998年度冰期中1998年1月14日00:00~16日23:50作为一个模拟时间段,取用每天08:00和17:00的测量冰厚值,并利用海冰生消的热力模式对冰面的太阳辐射、长波辐射、感热和潜热以及冰下的传导热进行了计算,结果如图1所示。表1给出了海洋热通量的计算过程和最后结果,其平均值为 179.65 W m^{-2} 。采用该值对1月14日00:00~16日23:50三天内的海冰厚度进行了计算,结果如图2所示。

利用以上计算方法,对1997~1998年度的海洋热通量进行了确定,得到整个冰期海洋热通量的变化趋势,如图3所示。从中可以发现,辽东湾的海洋热通量在不同的冰期有很大差

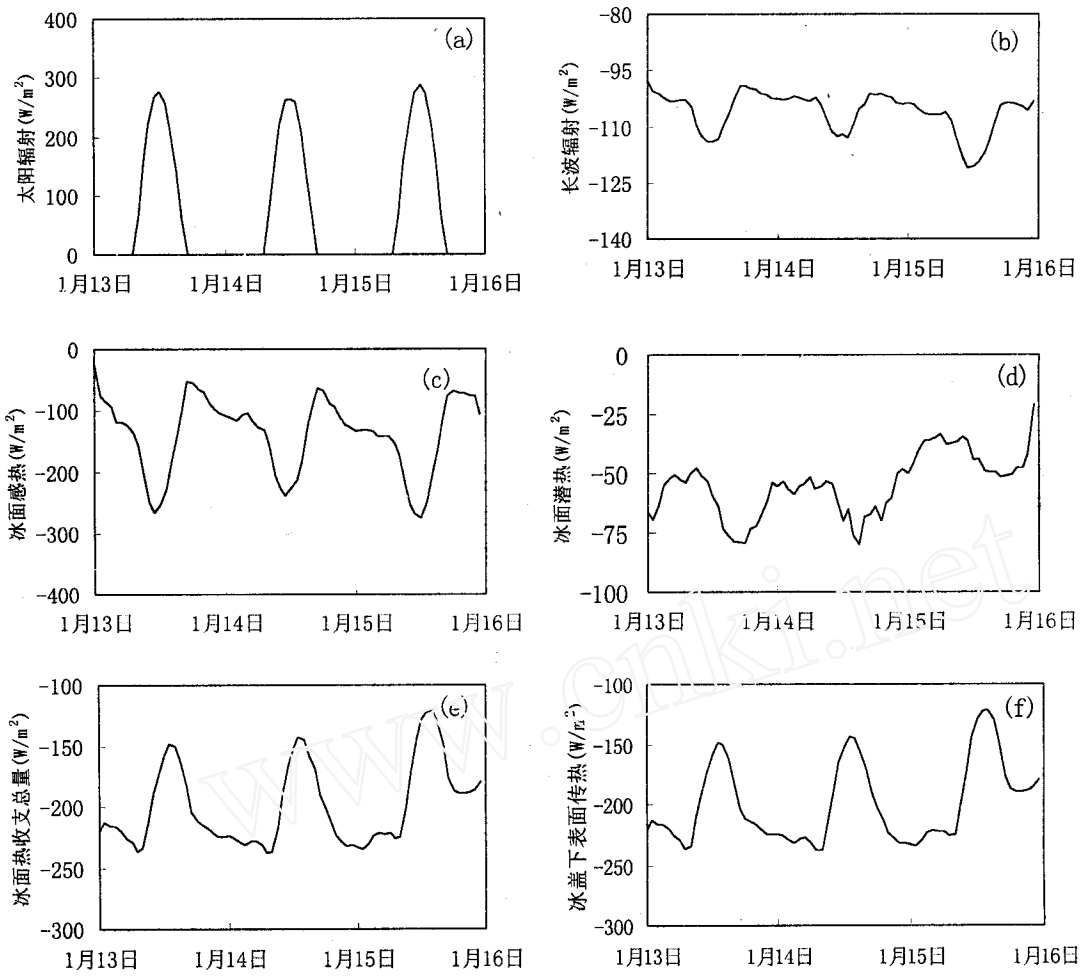


图1 1997~1998年1月14日00:00~16日23:50海冰热力要素计算值

(a) 太阳辐射; (b) 长波辐射; (c) 冰面感热; (d) 冰面潜热; (e) 冰面热收支总量; (f) 冰盖下表面传热

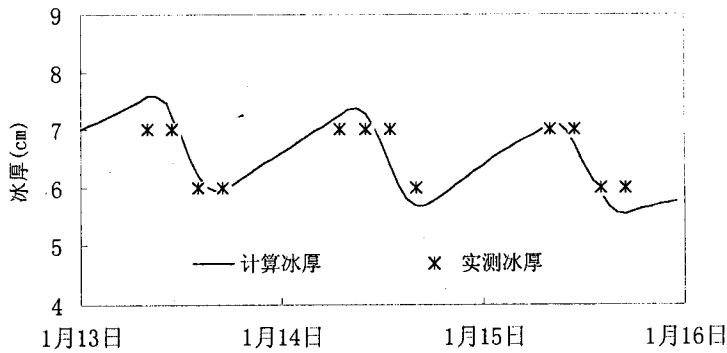


图2 1997~1998年1月14日00:00~16日23:00冰厚的计算值和实测值

表1 海洋热通量的计算过程及结果

日期	时间 t	$h_i(\text{cm})$	$h_{i(2)} - h_{i(1)}$ (cm)	$t_2 - t_1$ (h)	$\int_{t_1}^{t_2} F_e(t) dt$ ($\times 10^6 \text{ Wm}^{-2}$)	$\int_{t_1}^{t_2} Q_{sb}(t) dt$ ($\times 10^6 \text{ Wm}^{-2}$)	F_w (Wm^{-2})
1998-01-14	08:00	8.0	--	--	--	--	--
	17:00	6.0	-2.0	9	-6.519	4.287	255.31
1998-01-15	08:00	7.0	1.0	13	-12.194	0.322	188.93
	17:00	6.0	-1.0	9	-5.501	3.949	141.11
1998-01-16	08:00	7.0	1.0	13	-12.128	0.175	190.88
	17:00	6.0	-1.0	9	-4.831	4.193	112.91

异。在初冰期,由于海水温度较高,达到了 240 Wm^{-2} ;但随着冰期的延长,其值不断变小;在融冰期,气温的回升和太阳辐射的增强使冰盖从大气中获得的热量明显增加,又由于海水温度回升较慢,从而导致海洋热通量趋近于0。利用本文确定的冰期内的海洋热通量,对1997~1998年度整个冰期内的冰厚进行了计算,结果与JZ20-2平台上的实测冰厚是比较接近的,如图4所示。如果再考虑海冰动力作用的影响,计算结果将会更加理想。

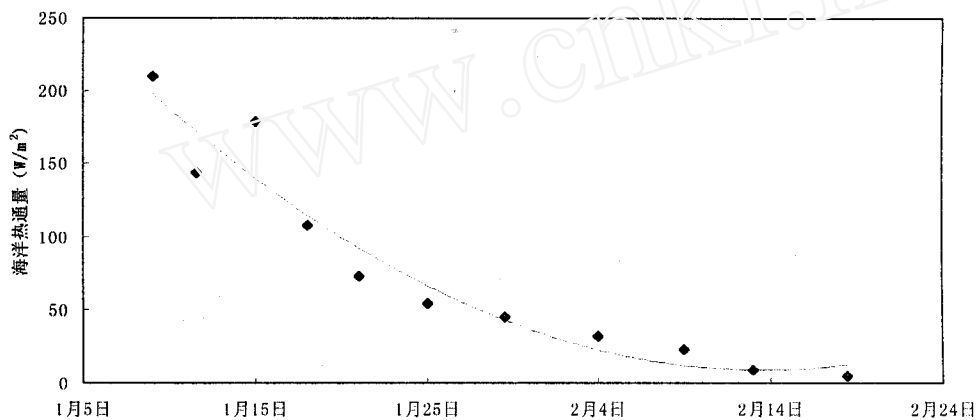


图3 辽东湾JZ20-2海域1997~1998年度海洋热通量的计算值及其拟合曲线

2.3 海洋热通量的影响因素

冰期海洋热通量除了受海水和海冰所固有的物理性质影响外,还与水温、海水盐度、天气条件、冰厚和海冰密集度等因素有关。

a) 水温变化:冰期内,海水温度有一个由高向低,然后达到平衡,最后再缓慢回升的变化过程。在这个过程中,由于冰盖下表面温度基本保持为海冰的融点,水温的变化直接关系到冰水间热量交换的大小。因此,水温的变化趋势是导致海洋热通量季节变化的最重要原因。另外,海流和水深等因素也对海洋热通量有一定的影响。

b) 海水盐度:由于海洋热通量是冰点和水温差值的函数,因此,不同盐度条件下,冰点的不同会导致海洋热量的变化。盐度越高,则冰点越低,海洋热量越大。

c) 天气条件:不同天气情况下,冰盖与大气间的热量收支和冰面太阳辐射也会影响到冰

盖内温度场的分布, 从而导致海洋热通量的变化。

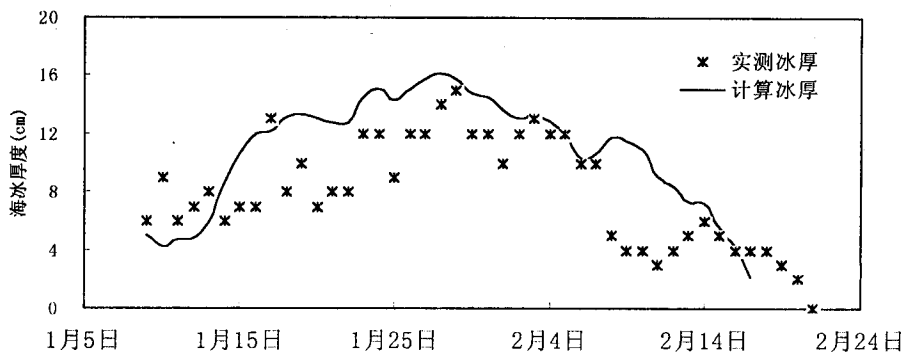


图4 辽东湾1997~1998年度计算和实测的海冰厚度

d) 海冰厚度: 在相同的气象和水文条件下, 薄冰和厚冰内温度梯度分布的差异也会使海洋热通量有明显的不同, 厚冰的海洋热通量要明显低于薄冰。

e) 海冰密集度。由于大气与开阔海面的热交换要比冰下海水的热交换大一个数量级以上, 因此, 在海冰密集度较小海域, 海水热量大多直接从开阔水面散失出去, 从而使冰下海洋热通量减少。

3 结 语

本文利用在辽东湾JZ20-2海域定点观测的气象、水文和海冰数据, 在海冰生消热力模式的基础上, 利用剩余法对渤海海洋热通量首次进行了确定; 在海洋热通量计算时, 针对渤海海冰较薄的特点, 充分考虑了太阳辐射对海冰生消的影响。对1997~1998年度冰期海洋热通量的计算结果表明, 辽东湾海冰的海洋热通量有明显的季节性变化, 在初冰期最大, 可达到 200Wm^{-2} 以上, 而在融冰期较小, 接近于0。这主要是由于水温的季节性变化引起的, 同时又与气象条件、海水盐度、海冰类型和厚度等因素有关。

本文工作仅是对辽东湾JZ20-2海域1997~1998年度的海洋热通量进行的计算和讨论, 确定了该海域海洋热通量的变化趋势和取值范围, 但其数值结果不能直接应用于其它海域和其它年份。海冰同海洋间复杂的热传递过程, 需要全面考虑冰水间的动量、热量和盐度耦合作用过程, 这是海冰数值模拟工作所面临的一个重要问题。

本文得到吴辉碛教授和田纪伟教授的指导和帮助, 在此一并致谢。

参考文献

- 1 Omsted A and Wettlauffer J S. Ice growth and oceanic heat flux: Models and Measurements. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97(c6): 9383~9390
- 2 Hibler W D III and Bryan K. A diagnostic ice-ocean model. *J. of Physical Oceanography*, 1987, 17, 987~1015
- 3 Shirasawa K, Ingram G R and Hudier E J J. Oceanic heat flux under thin sea ice in Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, Japan. *J. Marine System*, 1997, 11, 9~19

- 4 Perovich D K, Tucker III W B and Krishfield R A. Oceanic heat flux in the Fram Strait measured by a drifting buoy. *Geophys. Res. Lett.*, 16, 995~998
- 5 王仁树. 渤海海冰的数值试验. *海洋学报*, 1984, 6(4): 572~580
- 6 王志联, 吴辉斌. 海冰的热力过程及其动力过程的耦合模拟. *海洋与湖沼*, 1994, 25(4): 408~415
- 7 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
- 8, Lu Qian-Ming and Flemming T. Christensen. Summer Sea Ice Simulation in the east Greenland area. *IAHR Ice Symposium*, 1990, 251~258
- 9 Liu Q.Z, Bai S and Wu H D. Stability of thermodynamic sea ice model on the thermodynamic forcing. In: *Ice in Surface Waters, Proceeding of the 14th international symposium on ice*, New York, USA. 1998, 297~303
- 10 McPhee M G, Maykut G A and Morison J H. Dynamics and thermodynamics of the ice/upper ocean system in the marginal ice zone of the Greenland Sea. *J. of Geophysical Research*. 1987, 92(C7): 7017~7031
- 11 Wettlaufer J S. Heat flux at the ice-ocean interface. *J. Geophys. Res.* 1991, 96(c4): 7215~7236
- 12 Shirasawa K and Ingram G R. Currents and turbulent fluxes under the first-year sea ice in Resolute Passage, Northwest Territories, Canada. *J. Marine System*. 1997, 11, 21~32
- 13 Moore R M et al. A relationship between heat transfer to sea ice and temperature-salinity properties of Arctic ocean waters. *J. of Geophysical Research*, 1988, 93(c1): 565~571
- 14 Josberger E G. Bottom ablation and heat transfer coefficients from the 1983 Marginal ice Zone Experiment. *J. of Geophysical Research*, 1987, 92(C7): 7012~7016
- 15 Harvey L D D. Testing alternative parameterizations of lateral melting and upward basal heat flux in a thermodynamic sea ice model. *J. of Geophysical Research*, 1990, 95(C5): 7259~7365

作者简介: 季顺迎, 男, 1972年12月生, 在读博士生。专业为计算力学, 研究方向为海冰数值模式及其工程应用。发表论文4篇。

Determination and Analysis of Oceanic Heat Flux Under Sea Ice Cover in the Liaodong Bay

Ji Shunying and Yue Qianjin

State Key Lab. of Struct. Anal. of Ind. Equip., Dalian Univ. of Technol., Dalian, 116023

Abstract The calculative method of oceanic heat flux is discussed firstly, and the oceanic heat flux in the winter of 1997/1998 is calculated with the meteorological, oceanographic data and sea ice conditions observed on the JZ20-2 oil/gas platform in the Liaodong Bay. From the results, we can see that the value of the oceanic heat flux is more than 200 Wm^{-2} at the beginning of the freezing period, and then decreases continuously until it approaches 0 at the end of the winter. At last, the influence of season, meteorological and hydrological conditions, ice thickness and sea ice type on the oceanic heat flux are discussed. The oceanic heat flux in the Bohai Sea is calculated for the first time, and its trend in the whole winter is obtained.

Keywords sea ice; oceanic heat flux; numerical simulation