

文章编号: 1000-2022(2005) 04-0530-06

渤海海冰单点模式的气候模拟

王学忠^{1,2}, 孙照渤¹, 刘国波³

(1. 南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044
2. 解放军理工大学 气象学院 军事气象系, 江苏 南京 211104
3. 中国人民解放军 93175 部队 气象中心, 吉林 长春 130051)

摘 要: 利用 PW 1979 海冰热力模式, 考虑渤海的地理特点和气候特征, 假设渤海为薄层海洋, 引入二分法求解海冰表面温度。用该地区气候平均的云量、湿度、海平面气压和风速以及附近 4 站的月平均气温资料作为强迫场, 模拟了渤海海冰的气候变化。模拟结果与逐年的海冰级数资料具有一致的变率, 表明气温对海冰年际变化有重要影响。

关键词: 渤海海冰; 热力模式; 年际变化; 数值模拟

中图分类号: P463.25 **文献标识码:** A

渤海是连接环渤海城市群的纽带, 是京津的门户。然而, 渤海的部分地区冬季结冰, 对该地区的交通、能源、渔业等国民经济的重要产业有很大影响, 因此对渤海海冰的研究具有非常重要的意义。

Maykut 等^[1]建立了最为完备的海冰热力模式, 考虑了冰上雪盖、冰内盐度和透射太阳辐射引起的内部加热, 但是计算过于复杂; Semner^[2]对上述模式进行了简化, 使之更加适合于三维气候模拟。根据简化程度的不同, 简化模式分别称为零层或三层模式。Parkinson 等^[3]在零层模式 (简称 PW 1979) 中引入了水道参数化方案来描述海冰侧面热力过程。Lamke^[4]将 PW 1979 热力模式与混合层深海预报模式耦合。Bilz 等^[5]设计了一个能量守恒的海冰热力模式, 在该模式中海冰具有随时间不变的盐度垂直廓线, 该廓线为观测资料的拟合, 得到了广泛的应用。Ebert 等^[6]提出了考虑海冰厚度分布的海冰热力模式, 在模式中有对反照率非常敏感的表面参数化。方之芳等^[7]利用冰洋耦合模式模拟北极区域的海冰变化, 其海冰模式与 PW 1979 海冰热力模式相近。王志联等^[8]根据渤海冬季降雪很少的特点, 引进忽略雪盖影响的 PW 1979 热力处理方法, 与海冰动力模式耦合研究渤海海冰。王仁树等^[9]通过数值试验研究发现渤海海冰厚度主要受热力作用控制。目前, 渤海海冰业务预报模式已经在国家海洋环境预报中心投入运行, 并取得了较好的效果^[10]。

虽然渤海海冰的模拟和预报取得了长足的进步^[8-10], 但多以短、中期为主, 对于其气候变

收稿日期: 2003-10-10 改回日期: 2004-01-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40331010)

作者简介: 王学忠 (1971-), 男, 吉林柳河人, 讲师, 博士, 研究方向: 天气气候学。E-mail: wxz@163.com

化的机理还是缺乏足够的认识。下面的研究对渤海海冰年际变化进行了数值模拟, 并讨论了气温在渤海海冰年际变化中的作用。

1 资 料

相对湿度、总云量、风速资料来源于文献 [11]; 渤海的云遮蔽系数取中国近海 39°N 资料 [12]; 气温源自中国 160 个站的月平均气温资料, 用营口、天津、大连和烟台四站的平均气温来代表渤海气温; 海平面气压为 NCEP 再分析资料在该地区的多年平均值; 39 a 冬季渤海海冰级数资料引自文献 [13]。

2 模式介绍

采用单点模式, 主要参考 PW 1979 的热力部分, 并通过环渤海 4 站气温等气象资料和一些经验公式考虑渤海的天气气候特点, 模式设计时考虑了地理特征。渤海水平尺度小且具有封闭性, 将渤海视为一个单点; 所要研究的重点是海冰的总体特征的年际变化, 时空分辨率是匹配的; 渤海的平均深度约 20 m, 近似为薄层海洋, 透射至海冰之下的太阳辐射全部用来加热海冰底部; 由于冬季降水很少, 不考虑降雪的作用; 由于渤海海冰的厚度一般较薄, 因此仅对水道和海冰进行了区分。

2.1 热力计算

在无冰的情况下, 海气交界面的能量通量可写成

$$Q_{\text{net}} = H + L - Q_{\text{lw}} + (1 - \alpha_w)S + F_w. \quad (1)$$

式中, H 、 L 分别为感热和潜热, 采用块体公式计算; Q_{lw} 为有效长波辐射, 是海面发出的长波辐射与大气的逆辐射之差, 计算方法同文献 [12]; S 为太阳辐射, 由晴空太阳辐射再进行云量订正得到, 云量订正采用了文献 [12] 的公式, 云遮蔽系数取 39°N 的气候平均值; α_w 为海水的表面反照率; F_w 为深海向混合层的热量通量, 对于渤海是指通过渤海海峡的热交换作用, 取为 0。根据能量通量可计算出海水的温度变化。当海水温度小于冻结温度, 则有海冰生成。由给定的新生冰厚度 (0.10 m) 可计算出海冰密集度。

对于有冰的情况, 不考虑降雪的影响。冰的上表面的热平衡方程为

$$H + L - Q_{\text{lw}} + (1 - 0.40I_0)(1 - \alpha_i)S + (k_i/h_i)(T_b - T_{\text{sc}}) = 0 \quad (2)$$

式中, α_i 为海冰的反照率, I_0 为透射短波辐射占吸收的总短波辐射的比率, 取为 0.17; 左边最后一项表示冰的热传导, 其中 k_i 为热传导率, h_i 为海冰厚度, T_{sc} 、 T_b 为海冰上、下表面的温度。依照 PW 1979 的做法, 取透射辐射的 60% 作为冰表面的能量收支。PW 1979 采用了小参数展开的方法求解海冰表面温度。由于渤海海冰厚度较薄, 该方法出现了不稳定, 表现为海冰表面温度变化不连续。为了解决这一问题, 通过二分法迭代求解海冰表面温度: 取 (2) 式右端等于一个临时变量, 用气温作为海冰表面温度的初值迭代, 当临时变量大于 (小于) 0 时, 相应地减小 (增加) 表面温度, 直到该临时变量等于或非常接近 0。若表面温度小于冻结温度则海冰上部无融化; 反之, 取表面温度为冻结温度, 海冰上部融化为

$$-\Delta h_{\text{ui}} = \frac{\Delta t}{Q_{\text{il}}} \left[H + L - Q_{\text{lw}} + (1 - 0.40I_0)(1 - \alpha_i)S + \frac{k_i}{h_i}(T_b - T_{\text{sc}}) \right]; \quad (3)$$

海冰下部的厚度变化为

$$-\Delta h_{\text{ib}} = \frac{\Delta t}{Q_{\text{il}}} \left[F - \frac{k_i}{h_i}(T_b - T_{\text{sc}}) + 0.40I_0(1 - \alpha_i)S \right]. \quad (4)$$

式中, Δt 为时间步长, Q_i 为海冰的融解热, F 为海水向海冰底面的热量通量, 取为水道参数化引起的热量通量; 透过冰层的太阳辐射直接作用于海冰底部。另外, 海冰底面温度保持为冻结温度。

2.2 水道参数化

水道参数化包括垂直融化引起的温度调整, 水道温度变化, 海冰的侧向融化以及水道与冰下海水的热量交换, 方法与 PW 1979 一致。海冰在各种力的作用下, 不可能完全覆盖海面, 因此当海冰密集度超过一个临界值时, 在保持海冰的体积守恒条件下, 取密集度为该临界值 (取为 99%)。

3 模拟分析

3.1 对气候态的模拟

用气候平均的云量、云遮蔽系数、相对湿度、海平面气压、风速和气温 (图 1) 来强迫单点模式, 其中对气温进行了逐日插值。每年取为 365 d 模式的初始时间设为 7 月 1 日, 以 1 h 为时间步长; 海水的深度取为 20 m, 温度取为气温; 此时没有海冰存在; 海水温度取为气温主要考虑到夏季两者比较接近。另外, 对海温初值的敏感性试验表明, 在气候场强迫下, 海水温度迅速向平衡态海水温度靠近, 初值扰动的 e 折尺度小于 1 个月, 2 个月后接近 0, 而观测的初冰期一般在 11 月后, 模式还有 4 个月的时间消除初值的影响。

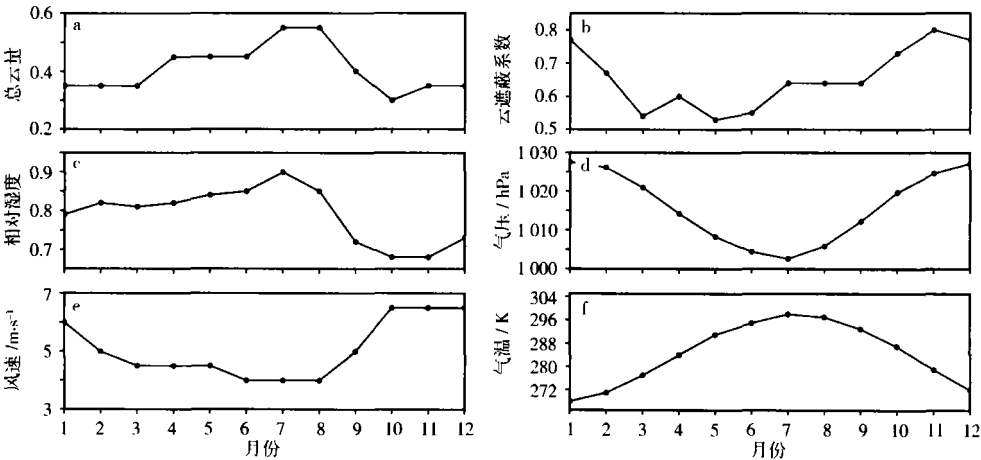


图 1 模式的强迫场

a 总云量; b 云遮蔽系数; c 相对湿度; d 海平面气压; e 风速; f 气温

Fig 1 Forcing fields of the model

a total cloud cover; b cloud shading coefficient; c relative humidity; d sea level pressure; e wind speed; f air temperature

模式积分 10 a 第 10 a 的结果 (图 2) 如下: 初冰日在 1 月初, 终冰日在 3 月中旬。观测的渤海冰期从 11 月初到次年的 3 月中下旬^[14], 模式模拟的结果在这一时段内。观测表明渤海中部 2 月水温最低, 与模拟的冰期对应; 8 月海温最高, 与模拟结果一致; 10 月至次年的 2 月水温高于气温, 3—8 月水温略低于气温, 与模拟的结果有一定的差别。冰面温度低于气温, 从 1 月初到 2 月下旬两条曲线近似平行 (图 2a), 说明两者之间存在线性关系, 与观测统计结果具有一致性。海冰厚度随时间变化曲线的形状类似于一个抛物线 (图 2b), 最大厚度略高于

0.35 m。海冰的增长速度和融化速度是不同的(图 2c): 增长速度随着厚度的增加逐渐变慢; 融化的速度随着密集度的减小而迅速增加。1 月海冰的平均增长率约为 $0.72 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$; 冻结期为 1 月初到 2 月中旬, 而融化期从 2 月中旬到 3 月中旬, 比例约为 1.5: 1。海冰密集度(图 2d)与海冰的厚度随时间变化曲线形状很相似。观测结果表明^[15] 1989/1990 年冬季的海冰融化对冻结的比率大约为 1.6 1 月平均的厚度增长率为 $0.8 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

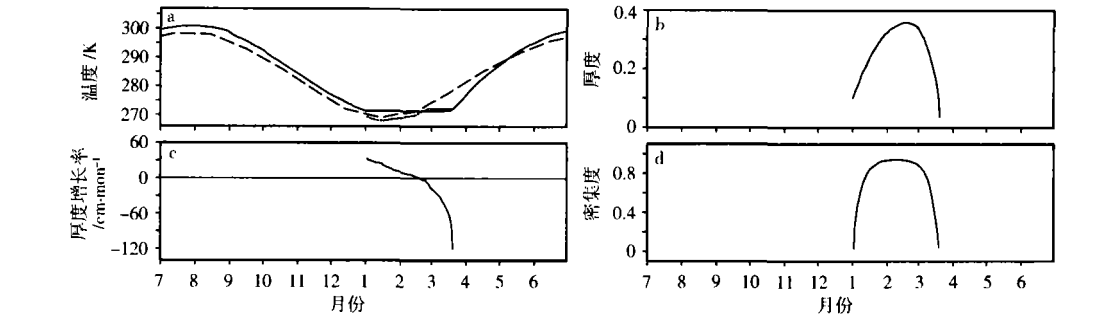


图 2 气候场强迫下模拟的第 10 a 结果
a 水温(实线)、气温(长虚线)和海冰表面温度(短虚线);
h 海冰厚度; c 海冰厚度增长率; d 海冰密集度
Fig 2 The 10th year results of model forced by climatic fields
a sea water(solid), air(dash) and ice-surface temperatures(dotted line);
h sea ice thickness c growth rate of sea ice thickness d sea ice concentration

3 2 对年际变化的模拟

气温资料采用月平均温度资料序列, 模式的起始时间取为 1951 年 7 月 1 日, 积分到 1990 年 7 月 1 日, 其他与 3.1 节处理方法相同, 模拟了海冰的年际变化, 模拟的结果如图 3 所示。为了便于对比, 图 3 还给出了同时段冬季渤海海冰级数^[13]。海冰级数按初冰期、终冰期、冰期、海冰的外缘线沿基线到岸的距离和最大冰厚确定^[16]。其中海冰外缘线到海岸的距离, 表示了海冰的范围, 类似于海冰的密集度。渤海海冰级数为 3 是正常年, 大(小)于 3 是冰情偏重(轻)年。模拟的初冰日(图 3a)和终冰日(图 3b)为海冰开始出现和冰完全消失的日期, 用在一年中的天数确定, 如果日期在前一年, 则天数减去 365。终冰日与初冰日之差为冰期(图 3c)。最大冰厚(图 3d)、密集度(图 3e)是指在冰期中海冰的厚度、密集度的最大值。最大密集度和最大厚度的乘积定义了最大冰量(图 3f)。为了评估模拟结果的合理性, 对模拟结果和海冰级数的关系进行了相关分析(表 1)。

表 1 模拟结果与渤海海冰级数的相关系数及置信水平

Table 1 Correlative coefficients between simulated results and ice grades and their confidence levels						
	初冰日	终冰日	最大冰厚	最大密集度	冰期	最大冰量
相关系数	- 0.446	0.131	0.745	0.545	0.368	0.747
置信水平	99 %	—	99 %	99 %	95 %	99 %

从表 1 可见, 海冰级数与初冰日存在负相关关系, 表明海冰的级数高, 那么初冰日早, 反之相反; 海冰级数和最大海冰厚度正相关, 海冰级数越大, 最大的海冰厚度也越大; 海冰级数与最大密集度之间正相关, 海冰级数大, 密集度大; 与最大冰量正相关, 海冰级数高, 相应海冰的冰量多。总之, 除终冰日外模式较为合理地模拟了海冰的年际变化。

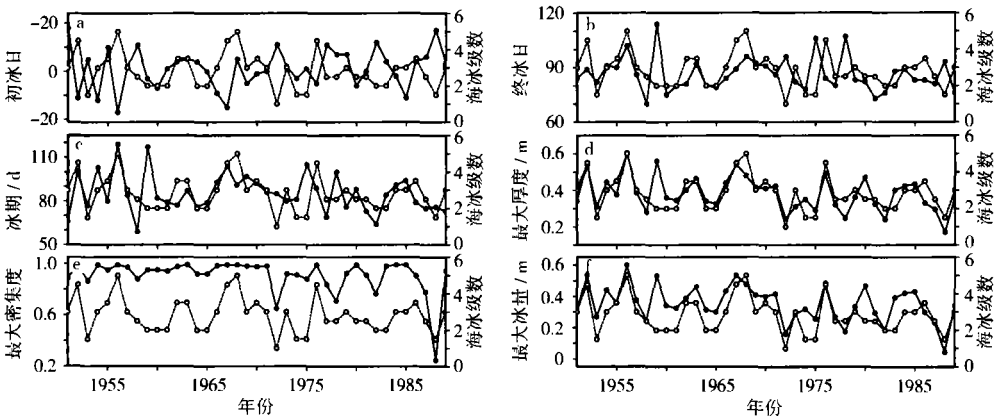


图 3 月平均温度强迫的模拟结果与观测的海冰级数的对比

a 初冰日; b 终冰日; c 冰期; d 海冰的最大厚度; e 海冰的最大密集度;

f 最大冰量 (虚线表示海冰级数, 数值标在图的右边)

Fig 3 A comparison between simulation results forced by monthly air temperature and observed sea ice grades

a first ice day b last ice day c ice days

d max ice thickness e max ice concentration f max ice volume

(Dotted lines denote the ice grades labeled on the right of each panel)

4 结果和讨论

在 PW 1979 热力模式的基础上, 充分考虑了渤海的地理特征和气候特点, 模拟了渤海海冰的气候变化, 得到以下结果:

对气候态的模拟表明, 海冰的厚度增长率在初冰期和观测的 $0.8 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的数值相当, 海冰的冻结速度和融化速度之比约为 1.5: 1, 和观测的比例 1.6: 1 接近, 海冰表面温度与气温存在线性关系和统计结果基本吻合。

在月平均气温序列的强迫下模拟渤海海冰的年际变化。初冰日、最大冰厚、最大密集度、冰期和最大冰量模拟结果与 39 a 海冰级数的相关性较好, 置信水平在 95% 以上。

模拟结果证实了气温是影响渤海海冰年际变化的一个十分重要的因子, 这说明对年度海冰强度分析时考虑冷空气的活动强度和频率是合理的。

存在的主要问题是模拟的密集度较气候平均状态^[14-17]偏大, 可能与模式未考虑黄海暖流的作用有关。采用更加复杂的海冰模式模拟渤海海冰的气候变化是有待研究的问题。

参考文献:

- [1] Maykut G A, Untersteiner N. Some results from a time dependent thermodynamic model of sea ice[J]. J Geophys Res 1971, 76 (6): 1 550-1 575.
- [2] Semtner A J Jr A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate[J]. J Phys Oceanogr 1976 6 379-389
- [3] Parkinson C L, Washington W M. A large-scale numerical model of sea ice[J]. J Geophys Res 1979 84(C1): 311-337
- [4] Lenke P A coupled one-dimensional sea ice-ocean model[J]. J Geophys Res 1976 92(C12): 13 164-13 172.
- [5] Bitz C M, Lipscomb W H. An energy-conserving thermodynamic model of sea ice[J]. J Geophys Res 1999, 104(C7): 15 669-15 677

- [6] Ebert E E, Schramm J L, Cuny J A. Disposition of solar radiation in the sea ice and upper ocean[J]. J Geophys Res, 1995, 100 (C8): 15 965-15 975
- [7] 方之芳, 宇如聪, 金向泽, 等. 1966~1991 年北极海冰模拟结果与观测的对比[J]. 大气科学, 1998, 22(3): 305-317
- [8] 王志联, 吴辉碇. 海冰的热力过程及其与动力过程的耦合模拟[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(4): 408-415
- [9] 王仁树, 刘旭世, 张立锟. 渤海海冰的数值试验[J]. 海洋学报, 1984, 6(4): 572-580.
- [10] 白 珊, 吴辉碇. 渤海的海冰数值预报[J]. 气象学报, 1998, 56(2): 139-153.
- [11] 中国气象局国家气象中心. 中国内海及毗邻海域海气气候图集[M]. 北京: 气象出版社, 1995 1-290
- [12] 阎俊岳, 陈乾金, 张秀芝, 等. 中国近海气候[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 18-21.
- [13] 解思梅, 包澄澜, 韦定英. 太平洋海温和渤海海冰[J]. 海洋学报, 1991, 13(3): 339-347.
- [14] 杨国金. 渤海海冰特征[J]. 海洋预报, 1999, 16(3): 10-20
- [15] 邓树奇, 张启文. 1989—1990 年冬季渤海和黄海北部结冰特征分析[J]. 海洋预报, 1991, 8(3): 39-45.
- [16] 陆钦年. 我国渤海海域的海冰灾害及其防御对策[J]. 自然灾害学报, 1993, 2(4): 53-59.
- [17] 包澄澜, 王喜年, 解思梅, 等. 海洋灾害及预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 132-155

A Study on the Bohai Sea Ice Climatic Variation Using a Single-Point Model

WANG Xue-zhong^{1, 2}, SUN Zhao-bo¹, LU Guo-bo³

(1 Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing 210044, China)

2 Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology Nanjing 211101, China

3 Weather Center No. 93175 Troop PLA, Changchun 130051, China)

Abstract Based on Parkinson and Washington (1979) thermodynamic sea ice model, China Bohai Sea geography and climatology, introducing a slab ocean assumption and the bisection method for calculating the ice surface temperature, using the monthly data including total cloud cover, relative humidity, sea level pressure and wind speed, together with monthly averaged surface air temperature at 4 surrounding coastal weather stations as the forcing field, the Bohai Sea ice climatic variation are simulated. Simulated results and observed annual sea ice grades have a similar variation trend, thus proving that air temperature is a decisive factor for the inter-annual variation of Bohai Sea ice.

Key words Bohai Sea ice; thermodynamic model; inter-annual variation; numerical simulation