

文章编号: 1000-2022(2003) 03-0424-09

近年来国外海冰模式发展的回顾

王学忠^{1,2}, 孙照渤¹, 胡邦辉²

(1. 南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044; 2. 解放军理工大学 气象学院, 江苏 南京 211101)

摘 要: 海冰是气候系统中的重要成员, 而海冰模式是描述海冰物理过程、模拟和预报海冰演变的有力工具。根据国外发表的文献, 对海冰模式从动力学、热力学和厚度分布三个方面的研究进行了回顾, 对海冰模拟的研究具有一定的借鉴作用。

关键词: 海冰模式; 热力模式; 动力模式; 海冰厚度分布

中图分类号: P461.6 **文献标识码:** A

海冰作为气候系统的一个重要成员, 受到了越来越多的关注。极地海冰地区是全球气候系统的重要冷源区。海冰严重影响了极地海洋和大气之间的热量和水汽交换。极地地区存在一个海冰—反照率的反馈机制, 对全球变暖具有放大的作用。一些研究表明, 大气环流模式对温室气体的敏感性与海冰的动力学处理^[1]、平均的海冰厚度和覆盖范围^[2]有关。由于海冰具有较小的盐度, 海冰的消融影响到海洋盐份的收支: 在海冰的冻结时, 混合层盐度增加, 海水下沉; 海冰融化则使海洋的层结稳定。海冰的运动可认为是淡水在海面的径流过程, 对海洋环流有重要作用。例如北极海冰向南输送与北大西洋热盐环流的关系密切^[3-5], 海冰的向南输送影响北大西洋深水的形成, 从而影响海洋中北大西洋输送带的强度, 进一步影响到全球的气候状况。

1 海冰模式发展的回顾

海冰模式的发展, 从 20 世纪 60 年代至今已有几十年的历史。海冰模式包括动力学模式、热力学模式及海冰厚度分布模式三个主要组成部分。Campbell^[6]发展了第一个引入流变学来计算海冰内力的海冰动力学模式。20 世纪 70 年代的北极海冰动力学联合试验(AIDJEX)对海冰动力学的发展有很大的促进作用。Hibler^[7]提出了粘塑流变学的海冰动力学模式。该模式成功模拟了北极的海冰环流及厚度分布, 在海冰模式的发展中具有重要地位。Maykut 等^[8]建立了完备的海冰热力学模式, 但是计算过于复杂。Semtner^[9]对文献[8]的热力学模式进行了简化, 简化后海冰热力学模式被许多海冰模式采用。Bitz 和 Lipscomb^[10]提出了考虑冰内盐泡对海冰表面融化作用的海冰热力学模式, 对海冰热力学模式的发展有重要贡献。海冰的厚度在空间上分布是不均匀的, Thorndike 等^[11]建立的海冰厚度分布公式, 用来研究海冰厚度分布的演化情况。最近的研究表明, 采用恰当的在海冰不同厚度之间的传输方案, 具有 5~7 个海冰厚度

收稿日期: 2002-09-13; 改回日期: 2003-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(40175023)

作者简介: 王学忠(1971-), 男, 吉林柳河人, 博士生, 研究方向: 天气气候学。

的分级,就足以描述海冰的气候作用。Hibler^[7]最早将海冰的动力和热力模式结合在一起。随后,海冰—海洋耦合模式得到发展。目前,海冰模式已经成为气候系统模式(CSM)的一个重要组成部分。由于计算条件的限制,海冰模式在多数全球气候系统模式中是高度简化的。比较而言,NCEP/NCAR的CSM中的海冰模式相对完善,但仍忽略了海冰切向应力的作用,模拟的海冰密集度在北太平洋和北大西洋的副极地地区偏大^[12]。

1.1 海冰的动力模式

海冰的动力学模式是基于表面风、海流和海冰的物质强度模型来预报冰盖的运动。海冰的运动受到5种力的作用:风应力、海流应力、海面高度梯度力、科氏力和海冰内力。其中海冰内力的计算是海冰动力学模式的关键和难点。

早期的研究集中于描述海冰的自由漂移而不考虑海冰之间的相互作用^[13-16]。其他的研究包括了复杂的海冰流变学,主要有:将海冰作为牛顿粘性流体^[6]、线性粘性流体^[17-18]或塑性物质。在20世纪70年代,北极海冰动力学联合试验(AIDJEX)提出了海冰的弹塑流变学^[19],在此之后,一些非线性塑性流变学得到了发展^[20-22]。在1979年,Hibler^[7]考虑了海冰的动力学和其厚度特征的相互作用,提出了非线性粘塑(VP)流变学的海冰动力学模式,并成功用于北极海冰季节循环特征的模拟。该模式作为一个标准的海冰动力学模式已经成为许多海冰模拟研究的基础。

在VP模式中,为了避免计算稳定性在海冰密集区的时间步长约束条件,方程的求解采用迭代方法^[7, 23-24]。然而,当网格数增加时,这些方法的收敛速度变得非常缓慢。在高分辨率的海冰模式或与大气(海洋)的耦合模式中,VP模式这一缺点表现尤为突出^[24-26]。克服这些不足主要从两个方面入手,即改进数值计算方案^[27-28]和简化模式。作为VP模式的简化版本,如不考虑海冰之间的相互作用的自由漂移模式及不考虑海冰切向应力作用的空化流体模式^[21, 29-30],在数值处理上是比较方便的,但是模式对这些简化是非常敏感的^[123]。类似地,用比椭圆屈服关系^[7]更加复杂的流变学关系^[19, 22, 31]的数值模拟结果表明,海冰的流变学特性显著地影响了长时间尺度的海冰漂移^[22]。

不同的海冰流变学特性对海冰的大尺度性质有何影响?在气候模式中采用何种流变学特性能最准确描述海冰内部应力?回答这些问题是海冰模式比较计划(SIMIP)的主要研究任务,该计划是全球气候研究计划(WCRP)中的北极气候系统研究(ACSYS)的一个子计划^[32]。Kreyscher等^[32]在综合的观测资料数据的基础上,对海冰流变学的作用进行了研究。其中海冰流变学特性包括:粘塑流变学、空化流体流变学、可压缩牛顿流体流变学和一个具有速度订正的自由漂流方法。所有模式采用了相同的网格、陆地边界条件、海冰热力过程和强迫场。用于检验模式模拟效果的综合观测资料数据包括:(1)由仰视声纳观测的海冰厚度资料;(2)由被动微波遥感计(SSMR和SMMI)观测的海冰密集度资料;(3)北极浮标计划观测的逐日浮标漂流数据;(4)由SSMI在85GHz通道遥感资料反演的海冰移动速度场。在进行比较之前,根据海冰的平均和逐日漂流速度的统计学特征,对各个模式分别进行了优化。通过海冰厚度的空间分布特征、在不同时间尺度的海冰漂流、逐日海冰移速的统计学特征和通过弗瑞姆海峡(Fram Strait)的海冰漂流来判断不同海冰流变学的影响。研究结果表明:粘塑流变学模式的模拟结果与观测资料最接近;简单的具有速度订正的自由漂流模式的模拟结果在海冰移动、海冰的厚度及通过弗瑞姆海峡的海冰输送方面都具有很大的误差;可压缩牛顿流体模式不能避免在北极中心海区过多的海冰生成,并且高估了弗瑞姆海峡的海冰内力;由于没有考虑海冰切向应力的作用,空化流体模式模拟的结果与海冰漂流的统计学特征和海冰厚度的空间分布特征有显著

的差别。另外,厚度的空间分布特征、在不同时间尺度上的移速、在不同区域/季节移速的统计学特征和弗瑞姆海峡的输送作用,对海冰流变学是敏感性的。各种海冰流变学特性的对计算资源的需求的比较表明,海冰粘塑流变学所增加的计算量相对于全球气候模式中的大气模式或海洋模式的计算量非常小。

由于采用了半隐式的求解方法,VP 模式对风应力在 1 d 的时间尺度上有明显变化的强迫场的反映不够准确^[33]。Hunke 和 Dukowicz^[34]提出了用条件共扼梯度法来提高 VP 模式的计算效率,并且对模式进行了改进,在海冰流变学中加入了类似弹性的成分,称为弹粘塑(EVP)模式。在 EVP 模式中的弹性不是物理上的弹性,而是为了计算的方便引入的,避免了早期弹塑模式^[35-36]的复杂性。与 VP 模式的对比试验^[37]表明:长时间尺度的积分两模式效果一致,而短时间的变化通过与北极浮标站资料的对比表明,EVP 模式对强天气尺度的强迫时间的反映更加迅速和准确。在高密集度区域,EVP 模式的弹性波没有明显改变海冰的状态。两模式中冰的内部应力也基本相同:在海冰的高密集度区域表现为粘塑特性,而在低密集度区域则显示出近似于自由漂流的特征。EVP 模式具有显式的计算方案,便于并行化处理。在并行计算机上的对比表明,EVP 模式极大地提高了模式的计算效率。因此,EVP 模式比 VP 模式在气候系统模式中有更好的应用前景。

1.2 海冰的热力模式

海冰的热力模式主要研究海冰的热力过程,海冰受到降水过程、大气和海洋热通量的影响,海冰的热力学特性显著影响了海洋和大气间的能量交换。Maykut 和 Untersteiner^[8]充分考虑了冰上的雪盖、冰的盐度和太阳透射辐射引起的内部加热的作用,建立了非常完备的海冰热力模式,并应用该模式对北极地区的海冰进行了模拟。结果表明,模拟得到的平均海冰厚度、海冰表面融化及海冰内部的温度特征与现场观测的结果基本一致。但是计算过于复杂,并不适合对大尺度海冰的热力过程的模拟。Semtner^[9]对上述模式进行了简化,减少了垂直的层数,改变了差分方案,并去掉扩散方程中的源、汇项,假定雪和冰的导热系数为常值。根据简化程度的不同,分别称为零层和三层模式。在零层模式中,假设海冰的垂直温度廓线是线性的,即不考虑海冰的热容量。而在三层模式中,海冰内盐泡的作用是通过透射太阳辐射在海冰中的存储来实现的。Semtner 的简化模式在气候模拟中得到了广泛的应用。但该模式在某些场合中缺乏通用性和有效性^[38]。Parkinson 和 Washington^[16]将零层模式应用到一个大尺度海冰热力动力模式中,并设计了水道参数化方案描述海冰的侧向融化过程;Lemke^[39]将文献[16]中的热力模式与海洋密度跃层模式进行了耦合,用来研究两极海冰下的海洋热通量的时空变化。

要准确描述海冰热力学过程就必须准确刻画海冰的热容量和融解热,而海冰的这些量与海冰内部的盐泡的作用关系密切。海冰内部的盐泡通过体积变化来维持它与海冰之间的热量平衡^[40],海冰的热容量不仅包括升高海冰温度的能量,还包括升高盐泡温度和融化盐泡周围海冰的能量。由于在海冰温度升高的过程中,内部已经有融化发生,所以融化海冰所需的能量要少于同体积的淡水冰。当海冰温度接近 0 时,盐泡在海冰中占很大体积比率^[41-42]。然而,许多海冰模式^[8,43]对这种依赖于盐度的热容量和融解热没有进行恰当的订正,需要更多的能量来进行表面融化。从这一点来看,这些模式不能保持能量守恒。

除了少数的研究^[44],在计算海冰表面融化时多数模式取海冰融解热为常量^[43,45-47]。Bitz 和 Lipscomb^[10]充分考虑了盐泡在海冰表面融化中的作用,发展了一个能量守恒海冰热力模式,并通过敏感性试验与非守恒模式进行了对比。非能量守恒模式低估了 12%~22% 多年冰在融冰季节的融化,高估了 50~124 cm 的海冰平衡厚度。另外,非守恒模式比守恒模式对外部

强迫扰动的敏感性差。两模式的细微差别在于守恒模式具有不随时间变化的盐度垂直廓线,而非守恒模式假设海冰具有上下一致的盐度。守恒模式在海冰的上表面附近具有较低的盐度,为观测资料的最小二乘法拟合^[42, 48]。这种盐度的垂直分布,使海冰表面的热传导和内部盐泡融化减少,导致了更多的表面融化。在夏季融冰期,海冰融水带走在海冰上层的盐份,减少了该处盐度,也减小了该处的密度。而守恒模式中假定海冰密度为常值,即流失盐泡的空间中不是充满了空气而是充满了水。因此,模式低估了海冰表面的秋季冷却和夏季升温。虽然多数海冰观测到的是类似于文献^[48]中一样向上递减的盐度^[41, 49-50],但也有一些观测表明海冰整个或局部厚度上为一致的盐度分布^[49, 51],这说明守恒模式在某些场合下存在适用性问题。

海冰的其他表面特性,如是否存在积雪或融水池、海冰的颜色等显著影响海冰对短波辐射的吸收和传播^[52]。Grenfell^[53]用二流传输方案研究了蓝冰和白冰中的辐射吸收情况。Jin等^[54]的研究表明,多年冰的上部10 cm吸收了约50%的净入射太阳辐射。这种吸收作用强烈依赖于波长,只有可见光部分能透射进入海冰深层及海水中;冰中的气泡对短波辐射有散射作用。Ebert等^[55]在以往工作^[43, 56]的基础上,考虑了海冰厚度分布的影响,采用了对海冰表面状态非常敏感反照率参数化方案的海冰热力学模式,研究了太阳辐射在冰—海系统中的分配情况,结果表明:太阳辐射有69%被反射,15%被雪吸收,12%被冰吸收,4%通过薄冰及水道进入混合层。

1.3 海冰的厚度分布

北极冰盖中包括了各种厚度尺度的海冰,海冰的强度、厚度增长率、表面温度、与大气间的涡动及辐射能量交换,海冰的盐度等强烈依赖于海冰的厚度分布^[57-59]。根据观测和模式结果,如果考虑薄冰的存在,海洋和大气之间的热量交换将加强^[57]。在北冰洋中部,具有厚度分布的海冰增长率是取单一平均厚度的增长率的两倍^[57]。在春季薄冰会融化消失,这样增加了水道的面积从而产生一个冰—反照率反馈^[60],并且薄冰易于弯曲、重叠,比多年冰更容易形成冰脊。海冰的厚度分布影响海冰强度,进一步影响到海冰的运动。具有水道和单一厚度的海冰模式(即两层模式),在当前的气候背景下能够模拟出令人信服的结果,但是对于气候的变化可能会产生错误的敏感性。非耦合的海冰模式模拟结果表明^[61],海冰厚度分布对海冰季节演化具有重要的作用。然而,许多气候系统模式中的海冰模式忽略了海冰厚度分布的物理作用。

对于海冰的厚度分布,Thorndike等^[11]定义了海冰厚度分布函数,提出了海冰厚度分布理论,建立了海冰厚度分布模式。该模式研究海冰热力学增长、消融及动力作用引起原有海冰的厚度空间上再分布对海冰厚度分布函数演化的作用。海冰厚度分布函数定义为该函数对海冰厚度在任一区间的积分等于该厚度区间的海冰密集度。海冰厚度分布函数对海冰厚度从0到最大海冰厚度的积分,其值为1;从最小海冰厚度到最大海冰厚度之间积分等于海冰的密集度。局地海冰厚度分布函数的变化由水平平流、海冰厚度再分布作用和海冰的热力增长三个因素所决定。其中平流作用可由平流方案来计算;海冰厚度再分布必须确保海冰面积、体积守恒,反映了海冰速度场的辐合、辐散及切变的作用,如薄冰在辐合流场的作用下,相互重叠形成冰脊的过程。整个区域的海冰体积的变化是由海冰热力学增长产生的。Thorndike等^[11]采用北极中心区域的三个浮冰站的资料,输入场包括海冰的速度场及随时间和厚度变化的海冰增长率,成功模拟了海冰厚度分布的演化过程。

Rothrock^[62]将海冰的厚度分布和海冰的流变特性联系在一起,海冰的厚度分布受到海冰的运动性质的影响,又影响到流变特性,而流变特性反过来影响海冰的运动,并指出海冰脊化作的功与冰块之间的力所作的功有关。在文献^[11]的基础上,Hibler^[63]将海冰的厚度分布和海

冰的动力学^[7]热力学^[9]模式耦合在一起,提出了与观测的海冰脊化物理过程一致的再分布函数。海冰厚度分布模式构造在固定的欧拉格点上,允许不等距的海冰厚度区间的划分,最薄和最厚的海冰厚度范围经过特别的处理,使得海冰在最薄和最厚海冰之间变化不会出现越界的现象。模拟的北极海冰的季节循环特征与观测基本一致。

Bitz 等^[59]采用全球耦合模式,包括原始方程的海洋模式、能量水汽平衡的大气模式和详细考虑厚度分布的动力热力学海冰模式,模拟了北极地区的海冰变化。在厚度分布模式中引入了在厚度空间上拉格朗日处理方法。模式考虑了海冰内部的垂直温度分布,海冰厚度密度函数取为 δ 函数的形式,允许海冰在设定的范围内发生厚度变化。设定海冰厚度区间的上、下边界,当某一厚度区间的海冰厚度大于(小于)上(下)边界时,海冰全部传输到上(下)一海冰厚度区间中,海冰的厚度不会小于事先设定的最小值,而最大的海冰厚度取为足够大,保证海冰不会超过这个最大厚度。因为没有类似于欧拉方法的扩散性,该模式可采用较少的海冰厚度分区,使计算量减小。与两层海冰模式比较发现,北极及北大西洋气候对海冰厚度分布是敏感的。考虑海冰的厚度分布后,模拟的弗瑞姆海峡海冰输送具有更大的变率且与北大西洋的经向涌升流联系更密切。通过北半球各海区对不同海冰厚度分区数的敏感性试验表明,大气和海洋之间的热量和淡水交换主要依赖于水道和薄冰,对超过 5 个的海冰厚度分区数不敏感,即约 5 个海冰厚度分区就足以描述这些重要气候通量的季节循环。当然,海冰厚度的最小分区数与海冰厚度分区是如何划分的及采用的是何种(欧拉或拉格朗日)方案有关。

在一些研究中^[44, 58],设定海冰的厚度区间内的厚度随时间变化而不被事先确定的边界所约束。在水道中有新的海冰生成,则临时加入一个新的海冰厚度类型,然后,将特性非常接近的两种海冰类型合并为一种类型,但某一类型的海冰厚度在相邻的格点上可能有很大差别,使海冰厚度的水平输送存在困难,因此这种方案可用于单点海冰模式的研究,而不适合于三维的模拟。

Lipscomb^[64]注意到,当仅考虑热力学增长对海冰厚度分布函数的作用时,其控制方程类似于一维的流体传输方程或连续方程。将活动边界处理的方法—再映射方法^[65]引入到海冰厚度分布的研究中,海冰的厚度区间用拉格朗日的网格元代替,它的上下边界随时间变化。类似于一维拉格朗日质量守恒方程中密度和体积的乘积保持不变,分布函数与边界之间距离的乘积保持不变,得到下一时刻的在位移后的边界范围内的平均分布函数。然后将该分布函数插值到原来的边界内,得到下一时刻固定边界内的分布函数。再映射方法的精度取决于插值的精度,可直接设计一个二阶精度的插值方案,获得厚度分布函数在海冰厚度空间上二阶精度的传输。该方案与文献[11]的方案存在两点主要的不同,首先在某一厚度区间内的海冰平均厚度可随时间变化;其次,海冰厚度分布函数随海冰平均厚度变化。Lipscomb 认为文献[11]的方案保持了面积的守恒,但不能保持体积的守恒。通过再映射方案与文献[63]及文献[59]的方案的对比如指出,文献[63]的方案虽然保持了体积和面积的守恒,但由于采用了具有较高扩散性的欧拉方案,需要较多的海冰厚度分区,导致计算代价大,另外,该方案为一级精度。文献[59]的方案由于采用了 δ 函数的方法,常出现某一海冰厚度区间内的海冰完全传输到相邻区间上而不存在海冰的情况,会对海冰的其他属性带来很大影响。再映射方案比文献[63]中固定每类海冰的厚度的方案具有较小的扩散性,比文献[59]中采用一系列 δ 函数来代替海冰的厚度的方法更容易数值化。再映射方法的收敛速度很快,设定 5~7 个海冰厚度分区,由有限差分导致的误差显著小于由其他因素导致的误差。同时发现线性的和抛物线型的再映射方案相比效果差别不大,即线性方案具有近似的两级精度。再映射方案计算量最小,适合在气候模式中使用。

2 小结和展望

海冰模式的三个部分一般是作为一个整体来研究海冰的变化,为了说明的方便对其进行了分解。海冰模式在气候系统模式的应用主要受到计算条件的限制。海冰动力学模式的研究主要集中在海冰的流变学特性上。在海冰模式比较计划中对四个海冰流变学特性的比较表明,粘塑流变学模拟的结果最好。粘塑流变学的半隐式计算方案对计算条件要求较高,不易并行化,并且模式对短时间尺度的强迫反映不敏感,比较而言,弹粘塑流变学具有一定的优势,被许多海冰模式采用。热力学模式在建立时就已经非常完备,由于受到计算条件的限制,其简化版本在气候模式中得到了广泛的应用。随着计算条件的改善,文献[10]的能量守恒模式已被一些气候系统模式所采用。海冰厚度分布模式的研究主要集中在厚度分布与海冰的热力、动力的耦合作用,其中热力作用在厚度空间上的传输是研究的重点。因为一些物理量是对不同海冰厚度分别计算的,海冰厚度分区数的增加会导致计算量呈线性或指数的增加。至少多少个分区数能满足重要气候通量模拟的需要是气候系统模拟的一个关键问题,最近的研究结果表明,采用拉格朗日传输方案,对海冰进行5~7个恰当的分区,模拟得到的重要气候通量的误差小于由于其他因素导致的误差。超级计算机的发展使在气候系统模式中细致考虑海冰模式成为可能。目前在气候系统模式中,正逐步用EVP或VP的动力学模式取代其他流变学的动力模式,用厚度分布的模式取代两层模式,用能量守恒的热力学模式取代其他的热力学模式。

海冰模式有待进一步研究的问题包括海冰的热力动力过程的参数化,及海冰流变学的继续探索和计算优化的问题。海冰的种类繁多,按形成类型分可分为平整冰和脊化冰,按冰龄可分为当年冰和多年冰,按流动性可分为浮冰及固定冰,各种不同种类的海冰的热力学和动力学特性有较大的不同,对不同的特性进行参数化是必要的。另外,海冰模式还需引入一些变量作为预报量,如海冰内部盐度对海冰热容量和融解热有影响,盐泡和气泡含量影响短波辐射在海冰中的传输,其变化规律对海冰的热力过程是非常重要的。再者,海冰表面特性的参数化问题,海冰表面特性比较复杂,在夏季可同时出现几种表面状态,如积雪、融水池、裸冰等,而融水池包括冰上融水的储存和径流问题,这些问题在单独的海冰模式中得到了部分的解决,但在气候系统模式中的应用尚需进一步处理。最后,海冰脊化和风对海冰表面积雪再分布的作用是值得研究的问题。

参考文献:

- [1] Pollard D, Thompson S. Sea-ice dynamics and CO₂ sensitivity in a global climate model[J]. Atmos Ocean, 1994, 32(2): 449-467.
- [2] Rind D, Healy R, Parkinson C, et al. The role of sea ice in 2 × CO₂ climate model sensitivity. Part I: the total influence of sea ice thickness and extent[J]. J Climate, 1995, 8(3): 449-463.
- [3] Holland M M, Bitz C M, Eby M, et al. The role of ice-ocean interactions in the variability of the North Atlantic thermohaline circulation[J]. J Climate, 2001, 14(3): 656-675.
- [4] Aagaard K, Carmack E C. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation[J]. J Geophys Res, 1989, 94(C12): 14 485-14 498.
- [5] Hakkinen S. An Arctic source for the Great Salinity Anomaly: A simulation of the Arctic ice-ocean system for 1955—1975[J]. J Geophys Res, 1993, 98(C9): 10 397-10 410.
- [6] Campbell W J. The wind driven circulation of ice and water in a polar ocean[J]. J Geophys Res, 1965, 70(14): 3 279-3 301.
- [7] Hibler W D III. A dynamic thermodynamic sea ice model[J]. J Phys Oceanogr, 1979, 9(4): 817-846.

- [8] 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.
- [9] Semtner A J. A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate[J]. J Phys Oceanogr, 1976, 6: 379-389.
- [10] 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.
- [11] Thorndike A S, Rothrock D S, Maykut G A, et al. The thickness distribution of sea ice[J]. J Geophys Res, 1975, 80 (33): 4 501-4 513.
- [12] Weatherly J W, Briegleb B P, Large W G, et al. Sea ice and polar climate in the NCAR CSM[J]. J Climate, 1998, 11 (6): 1 472-1 486.
- [13] Felzenbaum A I. The theory of steady drift of ice and the calculation of the long period mean drift in the central part of the Arctic Basin[J]. Probl North, 1961, 2: 13-44.
- [14] Bryan K, Manabe S, Pacanowski R L. A global ocean-atmosphere climate model. Part II: The oceanic circulation[J]. J Phys Oceanogr, 1975, 5(1): 30-46.
- [15] Manabe S, Bryan K, Spelman M J. A global ocean-atmosphere climate model with seasonal variation for future studies of climate sensitivity[J]. Dyn Atmos Oceans, 1979, 3: 393-426.
- [16] Parkinson C L, Washington W M. A large scale numerical model of sea ice[J]. J Geophys Res, 1979, 84(C1): 311-337.
- [17] Hibler W D III. Differential sea ice drift II: Comparison of mesoscale strain measurements to linear drift theory predictions[J]. J Glaciol, 1974, 13(69): 457-471.
- [18] Hibler W D III, Tucker W B III. Some results from a linear viscous model of the Arctic ice cover[J]. J Glaciol, 1979, 22(87): 293-304.
- [19] Coon M D, Maykut S A, Pritchard R S, et al. Modeling the pack ice as an elastic-plastic material[J]. AIDJEX Bull, 1974, 24: 1-105.
- [20] Pritchard R S, Coon M D, McPhee M G. Simulation of sea ice dynamics during AIDJEX[J]. J Pressure Vessel Tech, 1977, 99(j): 491-497.
- [21] Flato G M, Hibler W D III. Modeling pack ice as a cavitating fluid[J]. J Phys Oceanogr, 1992, 22(6): 626-651.
- [22] Ip C F, Hibler W D III, Flato G M. On the effect of rheology on seasonal sea ice simulation[J]. Ann Glaciol, 1991, 15: 17-25.
- [23] Holland D M, Mysak L A, Manak D K, et al. Sensitivity study of a dynamic thermodynamic sea ice model[J]. J Geophys Res, 1993, 98(C2): 2 561-2 586.
- [24] Oberhuber J M. Simulation of the Atlantic circulation with a coupled sea ice-mixed layer-isopycnal general circulation model. Part I: Model description[J]. J Phys Oceanogr, 1993, 23(5): 808-829.
- [25] Hibler W D III, Bryan K. A diagnostic ice-ocean model[J]. J Phys Oceanogr, 1987, 17(7): 987-1 015.
- [26] Oberhuber J M. Simulation of the Atlantic circulation with a coupled sea ice-mixed layer-isopycnal general circulation model. Part II: Model experiment[J]. J Phys Oceanogr, 1993, 23(5): 830-845.
- [27] Zhang J, Hibler W D III. On an efficient numerical method for modeling sea ice dynamics[J]. J Geophys Res, 1997, 102 (C4): 8 691-8 702.
- [28] Zhang J, Rothrock R. Modeling Arctic sea ice with an efficient plastic solution[J]. J Geophys Res, 2000, 105(C2): 3 325-3 338.
- [29] Nikiforov Y G, Gukovich A M, Yefimov Y N, et al. Principles of a method for calculating the ice redistribution under the influence the wind during the navigation period in the Arctic seas[J]. AIDJEX Bull, 1967, 3: 40-64.
- [30] Flato G M, Hibler W D III. On a simple sea ice dynamics model for climate studies[J]. Ann Glaciol, 1989, 14: 72-77.
- [31] Bratchie I. Rheology of an ice-floe field[J]. Ann Glaciol, 1984, 5: 23-28.
- [32] Kreyscher M, Harder M, Lemke P, et al. Results of the Sea Ice Model Intercomparison Project: Evaluation of sea ice rheology schemes for use in climate simulations[J]. J Geophys Res(Oceans), 2000, 105(C5): 11 299-11 320.
- [33] Hakkinen S, Mellor G L. Modeling the seasonal variability of a coupled Arctic ice-ocean system[J]. J Geophys Res, 1992, 97(C12): 20 285-20 304.

- [34] Hunke E C, Dukowicz J K. An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics[J]. J Phys Oceanogr, 1997, 27(9): 1 849-1 867.
- [35] Pritchard R S. An elastic-plastic constitutive law for sea ice[J]. J Appl Mech, 1975, 42E: 379-384.
- [36] Colony R, Pritchard R S. Integration of elastic-plastic constitutive laws[J]. AIDJEX Bull, 1975, 30: 55-80.
- [37] Hunke E C, Zhang Y. A comparison of sea ice dynamics models at high resolution[J]. Mon Wea Rev, 1999, 127(2): 396-408.
- [38] Semtner A J. On modeling the seasonal thermodynamic cycle of sea ice in studies of climatic change[J]. Clim Change, 1984, 6(1): 27-37.
- [39] Lemke P. A coupled one-dimensional sea ice-ocean model[J]. J Geophys Res, 1976, 92(C12): 13 164-13 172.
- [40] Schwerdtfeger P. The thermal properties of sea ice[J]. J Glaciol, 1963, 4(36): 789-807.
- [41] Eicken H, Lensu M, Lepparanta M, et al. Thickness, structure and properties of level summer multiyear ice in the Eurasian sector of the Arctic Ocean[J]. J Geophys Res, 1995, 100(C11): 22 697-22 710.
- [42] Maykut G A, Grenfell T C, Weeks W F. On estimating spatial and temporal variation in the polar oceans[J]. J Mar Syst, 1992, 3: 41-72.
- [43] Ebert E E, Curry J A. An intermediate one-dimensional thermodynamic sea ice model for investigating ice-atmosphere interactions[J]. J Geophys Res, 1993, 98(C6): 10 085-10 109.
- [44] Bjork G. On the response of the equilibrium thickness distribution of sea ice to ice export, mechanical deformation and thermal forcing with application to the Arctic Ocean[J]. J Geophys Res, 1992, 97(C7): 11 287-11 298.
- [45] Gabison R. A thermodynamic model of the formation, growth and decay of first-year sea ice[J]. J Glaciol, 1987, 33(113): 105-119.
- [46] Bitz C M, Battisti D S, Moritz R E, et al. Low frequency variability in the arctic atmosphere, sea ice and upper ocean system[J]. J Climate, 1996, 9(2): 394-408.
- [47] Flato G M, Brown R D. Variability and climate sensitivity of landfast Arctic sea ice[J]. J Geophys Res, 1996, 101(C10): 25 767-25 777.
- [48] Schwarzscher W. Pack ice studies in the Arctic Ocean[J]. J Geophys Res, 1959, 64(12): 2 357-2 367.
- [49] Cox G F N, Weeks W S. Salinity variation in sea ice[J]. J Glaciol, 1974, 13(67): 109-120.
- [50] Tucker W B III, Gow A J, Weeks W F. Physical properties of summer sea ice in the Fram Strait[J]. J Geophys Res, 1987, 92(C7): 6 787-6 803.
- [51] Eicken H. Salinity profiles of Antarctic sea ice: Field data and model results[J]. J Geophys Res, 1992, 97(C10): 15 545-15 557.
- [52] Maykut G A, Grenfell T C. The Spectral distribution of light beneath first-year ice in the Arctic Ocean[J]. Limnol Oceanogr, 1975, 20: 554-563.
- [53] Grenfell T C. The effects of ice thickness on the exchange of solar radiation over the polar oceans[J]. J Glaciol, 1979, 22(87): 305-320.
- [54] Jin Z, Stamnes K, Weeks W F, et al. The effect of sea ice on the solar energy in the atmosphere-sea ice-ocean systems: A model study[J]. J Geophys Res, 1994, 99(C12): 25 281-25 294.
- [55] Ebert E E, Schramm J L, Curry J A. Disposition of solar radiation in the sea ice and upper ocean[J]. J Geophys Res, 1995, 100(C8): 15 965-15 975.
- [56] Curry J A, Ebert E E. Annual cycle of radiation fluxes over the Arctic Ocean: Sensitivity to cloud optical properties[J]. J Clim, 1992, 5(11): 1 267-1 280.
- [57] Maykut G A. Large scale heat exchange and ice production in the central Arctic[J]. J Geophys Res, 1982, 87(C10): 7 971-7 984.
- [58] Schramm J L, Holland M M, Curry J A, et al. Modeling the thermodynamics of sea ice thickness distribution. I. Sensitivity to ice thickness resolution[J]. J Geophys Res, 1997, 102(C10): 23 079-23 091.
- [59] Bitz C M, Holand M M, Weaver A J, et al. Simulating the ice thickness distribution in a coupled climate model[J]. J Geophys Res, 2001, 106(C7): 2 441-2 464.
- [60] Curry J A, Schramm J L, Ebert E E. Sea ice-albedo climate feedback mechanism[J]. J Clim, 1995, 8(2): 240-247.

[61] Fichet T, Morales Maquenda M. Sensitivity of global sea ice model to the treatment of ice thermodynamics and dynamics[J]. J Geophys Res, 1997, 102(C6): 12 609–12 646.

[62] Rothrock D A. The energetics of the plastic deformation of pack ice by ridging[J]. J Geophys Res, 1975, 80(33): 4 514–4 519.

[63] Hibler W D III. Modeling a variable thickness sea ice cover[J]. Mon Wea Rev, 1980, 108(12): 1 943–1 973.

[64] Lipscomb W H. Remapping the thickness distribution in sea ice models[J]. J Geophys Res, 2001, 106(C7): 13 989–14 000.

[65] Dukowicz J K, Baumgardner J R. Incremental remapping as a transport/ advection algorithm[J]. J Comput Phys, 2000, 160(1): 318–335.

A Review on Development of Sea Ice Model in Foreign Countries during Recent Years

WANG Xue-zhong^{1,2}, SUN Zhao-bo¹, HU Bang-hui²

(1. Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044, China;

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

Abstract: Sea ice is a major component of climate system and the sea ice model is the most efficient tool to describe the sea ice physics and to forecast/ reproduce its evolution. Based on the published papers, the development of sea ice model in foreign countries is reviewed through three aspects: dynamics, thermodynamics and thickness distribution. This work is probably helpful for research of the sea ice concerning its modelling.

Key words: sea ice model; thermodynamics; dynamics; ice thickness distribution