



北极海冰数值模拟研究述评^{*}

郭智昌 赵进平

(中国科学院海洋研究所, 青岛, 266071)

提要 根据国内外近年发表的主要文献, 详细介绍北极海冰数值模拟工作的最新进展。综合评述各种主要动力学模式的特点和不足, 指出与数值模式有关的主要物理问题, 重点介绍海冰模式所特有的问题以及海冰数值模拟工作的发展方向。对以往的数值工作和海冰数值模拟的主要问题进行了总结, 并在理论和实践方面进行了深入探讨, 有助于我国相关工作的开展。

关键词 北极 海冰 数值模拟

学科分类号 P731

北极海冰是北极地区的主要环境因子之一, 对北极和全球环境变化有着极其重要的影响。人类在对北极冰进行观测、积累资料的同时, 一直在不断探索和研制海冰数值模式, 用于揭示北极海冰运动的动力学机制。随着模式水平的不断提高, 近年来海冰数值模式正在用于对北极海冰场的预报以及对全球气候变化的研究。目前, 数值模拟已成为北极海冰研究必不可少的手段。由于海洋、海冰和大气之间的相互作用非常复杂, 研制海冰数值模式的难度很大, 加之北极冰的力学性质又不同于流体和固体, 更增加了研究的难度。国外开展北极海冰数值模式研究已有近 30 年的历史, 而我国在这方面的刚刚起步, 迫切需要对已有的研究工作有全面的了解。本文首次总结、综述了国外诸模式的发展和有关的最新研究成果, 指出它们对北极海冰运动和分布规律模拟的成就和不足, 并对数值模式的未来发展作一些有益的探讨。

1 北极海冰数值模式发展状况

自 60 年代以来, 国外建立和发展了众多北极海冰模式。它们可分为动力模式、热力模式、动力-热力模式和海冰-海洋耦合模式等。早期的动力模式和热力模式, 简化了海冰的动力-热力耦合过程。热力模式着重研究冰的各种热力过程, 能够较好地模拟冰厚和冰范围的季节性变化; 动力模式着眼于刻划冰的力学特性和输运过程, 能够较好地模拟北极冰环流和冰厚的分布特征。70 年代末发展起来的动力-热力模式, 开始完整考虑海冰的动力和热力过程, 这类模式不仅在理论上更完备, 而且对北极冰盖的季节变化、冰漂移、冰厚度分布和海冰密集度变化有全面的描述, 逐步成为海冰数值模式的主流。由于大

^{*} 国家自然科学基金资助项目, 49476275 号。郭智昌, 男, 出生于 1969 年 2 月 4 日, 博士生, E-mail: zcguo@masqdio.ac.cn

气和海洋之间存在着的强烈的相互作用,从80年代中期,人们开始探求发展冰-海耦合模式,以求真实地体现冰-海间耦合过程。模拟结果表明,冰-海耦合模式可以更准确地模拟北极冰的冰缘位置、漂流方式、冰厚的季节和年际变化规律。

以上4种模式的发展状况分别综述如下。

1.1 动力模式

冰的输送主要由动力过程控制,最简单的输送模型是将冰漂移速度和方向与边界层风速、风向或海流流速、流向联系起来,得出经验公式。详细的动力学模式必须考虑作用在冰上各种力的平衡。相关的力有:风应力、海水应力、科氏力、冰内应力以及海面倾斜产生的梯度力。其中,如何刻划冰的力学性质,计算冰内应力是动力模式设计的关键。Campbell(1965)发展了第一个北极冰漂移模式。他的贡献是引入连续性方程对冰盖漂移速度及通量作出合理限制,同时用大尺度冰流变学来描述冰间相互作用机制,并以此计算冰内应力。

70年代,北极冰动力学联合试验(AIDJEX)研究组的成立促进了冰动力学研究,增进了对各种冰动力过程的全面了解。最初AIDJEX研究组认为,一个大尺度冰模式应将冰盖视为介于海-气间的二维强摩擦连续体,用大尺度平面应力-应变关系反映冰间的相互作用。因此发展了一系列二维粘性冰流变学理论,如各向异性粘性体、非线性粘性体和定常粘性体。粘性体的特点是依赖于时间。然而,由Parmeter等(1973)冰成脊模式计算出的成脊厚度存在一极限值,此为塑性流体特征,同时研究海冰成脊和水道开闭等变形机制也并没显示出冰的物质特性依赖于时间变化率,与塑性流体特征一致,所以AIDJEX研究组开始了冰塑性流变学的研究,他们将冰作为弹-塑性流体,并对不同物理过程作了参数化处理。Colony等(1975)构造了两维算法,并用于模拟Beaufort海冰状况。Coon(1980)对AIDJEX发展的模式作了回顾和总结,并经过数值试验检验,认为:AIDJEX模式足以描述空间尺度100km、时间尺度1d的大尺度冰动力过程。

AIDJEX结束后,Hibler(1979)对冰动力学研究作出了重要贡献。他依据前人用塑性流变学研究冰盖的成果,创造性地用粘-塑性流变学理论研究冰盖,并构造半隐式数值计算方案进行数值试验。结果表明,Hibler模式能较好模拟北极冰环流和冰厚的空间分布,模拟结果与观测资料吻合很好。他的动力学模式及其计算方法在各种冰模式中得到广泛应用。

90年代,Gray等(1994,1995)从理论上进一步研究了冰的流体特性。他将三维冰质量和动量守恒方程沿冰厚整层积分,在理论上推导出厚度积分应力场。进而,从尺度分析出发,研究了各种假设和小参数对这种应力-应变关系的影响,并在理论上证明了对粘-塑性本构关系,由于应力屈服曲线没有恰当考虑流场,常使辐散场中产生不真实应力,导致控制方程线性不稳定;为使模式能够正常运行,需引入扩散项。

1.2 热力模式

影响海冰生长和消融的主要热力过程有:吸收太阳短波辐射和大气长波辐射能、放射长波辐射能;海冰和大气间感热和潜热湍流交换;海冰和海洋间垂直热交换;海冰和水道间侧向热交换;冰上雪盖的影响以及冰内热传导。同时冰盖内盐包对海冰生长和消融也有重要影响,它夏季吸收、冬季释放短波辐射透射能,延缓冰的冻结。这些热力作用使冰

在上、下表面和侧面冻结或消融,共同影响着冰厚变化。在与大气和海洋非耦合的海冰模式中,海洋和大气的热力作用通常被认为是外强迫,海冰的存在明显地削弱了海-气间的湍流热输送,分子热传导过程成为热量穿过冰盖输送的主要机制。计算这些热收支项并导出冰的增长率或消融率,从而模拟冰厚的季节变化是热力模式的主要目标。

Maykut 等(1971)构造了迄今为止考虑最全面的一维海冰热力模式,他们用表面热平衡决定冰增长率,以扩散方程控制冰内热传导,且引入了雪盖、冰盐度、冰内卤水、气泡、短波辐射透射加热、冰密度垂直变化、传导率和比热的影响,模拟出北极中心的平均冰厚、表面消融量和冰内温度场与观测资料一致。该模式给定入射辐射、湍流通量、海洋热通量和降雪量,但没有涉及相应的大气和海洋物理量,无法讨论大气和海洋边界层的湍流通量以及无冰水面向冰盖状态的转化。同时,模式达到平衡态所花的模拟时间太长,也不利于发展为三维模式。后来, Semtner(1976)对该模式作了大量简化,使其适合于三维模拟,后人的热力学模型大部分在 Semtner 工作基础上继续发展。Parkinson 等(1979)将冰热力学模式扩展成为大尺度三维模式,对 Semtner 的热力学计算作了部分改进,特别是考虑了水道的影响。尽管水道的空间尺度只有 0.1—10km,但其海-气热量交换比冰面大一个量级,冰与水道以及冰下水与水道间的热交换对热平衡起着重要作用。该模式考虑了这一热力过程,并作出较为合理的水道参数化方案,对冰厚和范围的季节变化作出了合理的模拟,同时也因其热力学考虑合理、全面而得到广泛引用。

90 年代以来,对海冰热力学过程的考虑更加细致、全面。Ebert 等(1993)考察了冰与大气间的热力过程,Ledley(1991)考察了雪盖对冰热收支的影响,这些研究必将改进冰热力模式和冰模式对热力过程的模拟。

1.3 动力-热力模式

海冰的热力过程通过消融和冻结改变冰厚和水道分布,由此影响冰漂移;海冰的动力过程通过成脊和平流改变冰厚分布,从而影响冰热力过程。这两种过程同时发生,相互影响,共同控制着冰漂移和生消。前述两类模式都是对其中某一过程用特定方法处理,然后详尽模拟另一过程。到 70 年代末,人们开始发展动力-热力模式,同时探求冰的热力和动力过程,众多热力和动力学研究成果被用到了动力-热力模式中。较突出的工作有 Hibler 等(1980, 1982)和 Walsh 等(1985)。他们将 Hibler(1979)动力学计算和 Semtner(1976),Parkinson 等(1979)热力学计算结合在一起,全面考虑冰的动力和热力过程,对北极冰数值模拟作了进一步改进。模拟结果表明,这些模式可以更好地模拟北极冰厚度分布、漂流方式和覆盖范围的季节和年际变化规律。

1.4 海冰-海洋耦合模式

海洋热状况强烈影响着海冰热状况,海洋环流也在动力上影响着冰漂流。特别是在格陵兰海和挪威海,南向前进的海冰、冷性水团与北向暖流遭遇,在动力和热力上同时强烈影响冰漂移与冰缘位置。显而易见,真实的热力和动力过程必须考虑北冰洋和周边海域的环流状况和热状况。Hibler 等(1982)在评价冰模式能够在多大程度上模拟北极冰季节和年际变化,以及最需要作出的改进时也指出,北大西洋冬季冰和夏季水道模拟结果均比实测值偏大,主要是因为没有合理考虑海洋、雪盖以及冰内热贮量的热力影响,耦合海洋模式可改进对冰漂移、北大西洋冰盖和冰缘位置的模拟。随后,Hibler 等(1987)的冰-

海耦合海洋模式消除了模拟中北大西洋冬季过多的冰量。Semtner(1984)考虑冰内盐包热贮量的影响,部分解决了北大西洋夏季冰融化量过多的问题。

最初对北极冰季节循环的模拟,海洋只用一个定常厚度静止的海洋混合层代替,在热力学方程中附加一项深海向上输送的定常热通量。Pollard等(1983)曾用一个可变厚度一维混合层来代替海洋,但没有耦合复杂的海洋物理过程。Hibler等(1987)第一次将冰、洋模式耦合。尽管海洋模式深层计算是诊断性的,但改进了对格陵兰和巴伦支海冰缘位置以及北大西洋冬季冰量的模拟,这个Hibler-Bryan模式也被用来作为美国海军在舰艇数值海洋中心(FNOC)的业务预报模式(即PIPS, Riedlinger *et al.*, 1991)。预报结果显示,冰增长和消融的季节形势预报和观测总体一致,只是巴伦支海和格陵兰海的冰盖模拟有些过量,Riedlinger认为是由于模式对西Spitsbergen流等狭窄流的分辨率不够。Hibler等(1987)冰-海耦合模式中的海洋模式是诊断模式,不利于模拟时间尺度很长的海洋中、底层现象,为此Semtner(1987)将模式中的海洋部分发展为完全预报性模式,进一步改进了冰-海耦合模式。

1.5 与海冰模式有关的其它研究

1.5.1 冰模式开边界条件的处理和球坐标系下的冰模式

北极冰盖覆盖范围是变化着的,冰缘也在不停移动,因此模式在固定域上数值积分就会导致许多计算困难和误差,特别是给位于冰缘附近模式开边界条件的处理带来困难。同时,北冰洋和周边海域间不仅存在着冰的运输,而且周边海域冰量较少,北冰洋和周边海过渡区有冰辐散,也就有较大面积的自由海面,热力作用会使该过渡区有较多冰形成,因此合理描述北冰洋和周边海域过渡区的热力和动力过程,处理这些区域模式的开边界条件成为研制北极冰模式的一个难题。为改进有限区域冰模式的局限性,许多模式将模拟区域从北冰洋扩展到整个北半球(Hibler *et al.*, 1982; Walsh *et al.*, 1985)乃至全球(Oberhuber, 1993),不仅避免了这样的难题,而且还考虑北冰洋和周边海域间的物理过程,对海冰模拟作了进一步改进。

此外,许多大气和海洋环流模式是建立在球坐标系下的,为易于和这些大气及海洋模式耦合,发展球坐标系下冰模式也是极为必要的。Oberhuber(1993)发展了球坐标系下冰模式,该模式与混合层-等密度面海洋环流模式耦合。Holland等(1993)对此模式作了大量试验,证明Oberhuber模式可以合理模拟北极冰盖的季节变化、冰厚、密集度和速度场等主要特征。

1.5.2 海冰模式敏感性分析

冰模式计算涉及大量参数,它们对海冰模拟起着至关重要的作用。为取这些参数的合理值和评价模式对众多参数的敏感性,前人作了大量工作。Holland等(1993)对Oberhuber(1993)模式作了大量敏感性分析,认为模式对海洋热通量和云量敏感,而对初始条件、混合层特性(如海洋反射率、盐度、深度)等因素不敏感。Chapman等(1994)用一个统计模式去评价13个参数的敏感性,结果表明:(1)模拟结果对水道百分比阈值、感热交换系数以及大气和海洋拖曳系数最为敏感;(2)冰厚异常的时间尺度比冰覆盖面积异常的时间尺度长,也就是冰厚在年际变化中是一个比冰覆盖面积更保守的变量,监测时冰厚取样频率可以比冰范围的少。由于冰模式不仅对模式参数敏感,而且对大气外强迫也特别敏感,为此Fischer等(1994)计算了使模拟变量与标准模拟相比偏差不超过10%时,大气强迫场和模式参数所允许的误差。他们的结论是:(1)冰漂移方

式强烈依赖于大气和海洋的拖曳系数比; (2) 夏季冰盖范围和体积强烈依赖于热力强迫, 特别是海面气温, 同时总云量和湿度也较为重要, 夏季冰模拟变量似乎对风场不敏感, 而冬季冰范围和体积既依赖于热力因素又依赖于动力因素; (3) 冰范围几乎独立于模式参数, 而冰盖体积对模式参数的变化十分敏感, 因此冰厚观测对模式参数优化最有价值。

1.5.3 多级冰厚冰模式 冰的厚度与其动力和热力过程密切相关。在热力学上, 冰增长和消融的速率既影响着冰的厚度又受到冰厚的制约。在动力学上, 一方面, 冰盖厚度分布不均, 因而其相对运动都将导致冰厚的再分布, 特别是成脊作用可将薄冰变为厚冰, 且产生自由海面; 另一方面, 冰厚对动力过程也有影响, 厚冰主要传递冰内应力, 阻尼冰相对运动, 不改变所传递的冰应力, 而薄冰传递应力时变形, 影响冰盖中的应力分布。因此, 冰厚与冰热力、动力过程紧密相连, 模式对冰厚描述的复杂性强烈影响着模式的模拟效果。早期的许多模式 (如 Hibler, 1979) 用两级冰厚, 也就是一个模式网格内只有两种厚度的冰, 一种为厚度一致的厚冰, 一种为薄冰, 而水道被认为有与薄冰一样的力学效果而按薄冰处理, 无疑这种冰厚描述是肤浅的。因此有众多工作致力于改进模式对冰厚的描述, 如 Walsh 等 (1985), PIPS (Riedlinger *et al*, 1991) 使用 7 级冰厚模式。Thorndike 等 (1975) 提出了冰厚分布理论, Hibler (1980) 将其应用到冰模式中, 作多级冰厚动力计算, 对海冰模式作了进一步改进。

1.5.4 沿岸冰带的数值模拟 沿岸冰带与大洋冰缘紧密相连, 受到冰缘存在的显著影响, 同时冰分布稀疏, 有着复杂的动力和热力过程, 而且冰缘的存在引发了诸如冰缘上升流、海洋锋面、海洋涡旋、冰缘海洋急流等水文现象, 影响了沿岸冰带冰缘位置和浮冰分布, 这些物理过程的复杂性也使得沿岸冰带的数值模拟比冰盖中心更为困难。Shen 等 (1987) 曾用流体 - 固体本构关系描述稀疏冰的力学特性, 发展了边缘冰带海冰模式。Kantha 等 (1989) 考虑和海洋的耦合行为, 发展了白令海边缘冰带冰 - 海耦合模式。

2 北极冰数值模式中的一些问题以及未来的发展

冰的流变特性既不同于水、大气, 又不同于一般刚体, 同时它又是介于海洋和大气两种截然不同时空尺度过程间的一个薄层, 存在着复杂的热力和动力过程, 所以模拟时有许多要特别注意的问题。

2.1 冰模式的时空尺度

冰是大气和海洋的界面, 维系了两个不同的时空尺度过程, 大气运动快, 而且充分混合, 在几天的时间尺度上有较大变化, 而海洋则较为缓慢, 上混合层发生较大变化常需数月乃至数年, 而深层则需更长。另外, 大气热容量较小, 变化剧烈, 而海洋热容量大, 有较长的热记忆能力, 两种介质的耦合具有较宽时间滞后。冰介于海洋和大气之间, 与大气和海洋存在着很强的动力和热力相互作用, 所以模拟北极冰运动时, 为模拟冰、海、气耦合行为, 以及海、气强迫下冰的响应必须合理选择模式和外强迫的时空尺度。同时, 冰模式的物理量与一般大气和海洋模式稍有差别, 具有某种统计含义, 所以它的各种动力学与热力学参数化和模式的时空尺度紧密相连, 而且, 不同时空尺度涉及不同的物理学机制, 因此用已有模式研究其它时空尺度的冰物理现象时, 应作大量观测和模拟试验, 以检验模式性能。

绝大多数模式对空间尺度 100km、时间尺度 1d 的冰运动和分布规律有较好分辨率。对其它时空尺度的冰物理现象, 是否这些模式已经考虑了所有必需的物理机制, 现在还不

很清楚,还必须做更多的观测与模拟试验。

2.2 平衡方程以外的各种机制

大尺度冰盖上总有一些裂缝,现行模式的控制方程难以描述产生这些裂缝的所有机制及相伴随的热力和动力过程。如冰形成时膨胀爆裂可使冰盖产生热力裂缝,海洋波和地壳不稳定弯曲都会使冰盖破裂,海洋潮汐可产生周期性和永久性水道。虽然这些机制及其对海冰物理现象影响的重要程度尚有疑问,但无疑这些不同机制产生的作用,有别于控制大尺度冰盖运动的作用力,参与热力和动力过程。这些作用力在现有海冰模式中都没有包括,它们在哪些现象中起重要作用,在哪些时空尺度下必须考虑,尚待进一步研究。

2.3 连续性与不连续性

冰盖象粒子介质,是裂缝、水道和由它们分离的象粒子一样的离散浮冰构成的混合体。尽管离散性在小尺度上更准确地描述了冰盖,然而对大尺度引用连续性假设,用流变学描述其聚集行为更方便。而且模式试验也证明,在某种近似意义上,对这些引用连续性假设的海冰模式,用模式变量的平均量可较好地描述海冰的大尺度特征,同时也可解释一些实际的小尺度现象。但连续性假设究竟在何种意义上成立有待进一步评判。

2.4 冰和大气、海洋间的耦合过程以及北极冰对全球气候变化的影响

北极冰模式与大气和海洋模式相耦合,才能真实地模拟出自然界中冰的各种物理过程。耦合时,许多因素,如冰、海、气三者截然不同的时空尺度和各分模式精度不一的初始资料,都会影响模式性能。众多模拟试验也证明耦合模式并不一定能得到比非耦合模式更好的结果,因为一个分模式计算中出现的误差对另一个分模式计算会有不利影响。如 Washington 等(1980)模拟出来的海冰分布,比非耦合模式模拟的结果差。尽管如此,冰与大气、海洋模式耦合是未来发展的一个重要方向。特别是对研究穿北极流轴心的年际变化和变化规律,顺时针涡旋覆盖面积变化的量级和原因,以及北极冰分布和运动及其变化对全球气候变化的影响等一些尚未完全研究清楚的问题,冰-海-气耦合是解决这一问题的主要途径。现行冰-海耦合模式比较成功,而冰-海-气完全耦合模式还有待于进一步发展。

2.5 冰的流变特性

如何描述冰的流变特性和计算冰内应力是冰模拟的一个难题。Campbell(1965)视冰为高粘性流体,AIDJEX 模式将冰作为弹-塑性流体(Coon, 1980),Hibler(1979)认为粘-塑性流体更能描述冰的力学特性,Flato 等(1992)视冰为空穴流体,这些流变学理论对冰流体特性的刻划各有其成功之处。如粘-塑性本构关系反映了冰不依赖于时间变化率的物质特性,和成脊物理学相一致,它既可模拟近岸,亦可模拟远岩冰漂移;空穴流体允许简单、经济的数值格式,有利于在长期气候模拟中应用。但是,冰是一种特殊流变体,它在不同的空间尺度上,具有不同的流变学特性,弹性体、粘性体、塑性体、粘-塑性体和空穴体等任何单一本构关系都不可能完全描述冰的这种特性,特别是粘-塑性流变学的本构关系在流场辐散时会产生虚假应力,引起模式线性不稳定(Gray *et al.*, 1995),同时计算复杂,花费计算机时间多;而空穴流体又不太适合对切变力较为重要的局地漂流的详细研究,所以仍需改进冰流变学理论。

在各种流变学理论中都引入一些假设。如在卫片中可看到 100km 尺度上的水道、裂

缝、冰脊随机分布,引入各向同性假设,此时应力屈服面可用应力不变量表示;冰盖一旦出现 100km 尺度上的裂缝,会马上贯穿整层冰厚,因此冰盖不能抵抗任何 100km 尺度上的拉力,所以引入假设:冰盖不阻尼辐散,只对切变和辐合阻尼。此外,绝大多数塑性冰模式中都将切变等引起的功率消耗视为小量,不予考虑。这些假设对各种时空尺度冰模式的模拟都有影响。所以设计合理的冰流变学理论,确切描述冰盖的动力过程仍是未来发展的一个重要方向。

2.6 冰动力学和热力学参数化

冰模式中涉及到许多动力学和热力学参数化,如何选择参数化方案和合理选取参数值存在较大问题,特别是计算冰内应力中本构关系的选取、冰强的计算和冰与水道热交换过程的参数化仍需做大量工作。AIDJEX 模拟结果指出,由冰厚分布计算冰强没有得出满意的结果,应该在冰厚分布方程中考虑由于浮冰切变而消耗的能量。同时,尽管 Parkinson 等(1979)的模式中考虑了水道参数化,但现行冰热力-动力模式和冰-海耦合模式中对水道侧向消融和结冰等热力过程的考虑还非常简单。另外,许多模式用多级冰厚描述网格内冰分布,以面积比作为权重,用各种与冰厚相伴随的冰强等特性来表示冰的总体特性,在理论和数值试验方面作了诸多探讨,但这些特性间关系以及冰厚分布对成脊的影响由于实测资料较少,还未得到满意的参数化方案,有待于进一步发展。

2.7 沿岸冰带的数值模拟

沿岸冰带和中心海域高密度冰盖的物理过程明显不同,数值模式的建立也比一般大尺度冰模式困难。第一,由于冰缘的存在,沿岸冰带存在着诸如冰缘上升流、急流、锋面、涡旋等复杂的水文现象;第二,这些区域冰分布稀疏,大气和海洋存在着强烈的热交换,影响了冰缘位置和各种物理量的分布;第三,潮汐和部分河流径流量也影响着边缘冰带的动力和热力过程;第四,沿岸冰带数值模式应该有较好的空间分辨率,但模式网格减小,又会涉及到许多小尺度过程。因此沿岸冰带数值模式的建立必须作大量细致的观测和模拟研究,这也是未来发展的一个重要方向。

2.8 资料问题

海冰模式对大气和海洋等外强迫资料非常敏感,而所需的诸如海面温度、海面高度、海面风场、海流、海面气温、降雨量、降雪量以及云量等大量资料来源各不相同,精度不一。有的来自气候资料,有的来自遥感探测,有的来自数值预报产品,严重影响了模式的模拟结果。同时,模式需要冰厚、冰密集度的初始资料,现行模式中均取均一厚度和密集度作为初值,这无疑影响了冰的模拟,所以获得较为真实的冰厚、密集度分布资料,特别是利用卫星遥感技术获得更真实的大范围冰厚分布资料,也是改进模式的一个方面。

3 结语

经过近 30 年的发展,北极海冰数值模式已从早期的热力或动力模式,发展成综合考虑动力和热力作用的动力-热力模式。模式越来越精细地刻划每一个过程,得到不断发展和完善。对于大尺度海冰的力学特性,也从弹性、粘性等特征的描述发展到用粘性-塑性和空穴流体来刻划。到目前为止,海冰数值模式不但可以很好地模拟各种主要的冰特征,而且可以较准确地开展海冰预报。随着冰-海耦合模式的发展,海冰模式在精度上又有了新的提高。

海冰数值模拟工作正在向以下几个方向发展: (1) 进一步发展对冰流变特性的刻划, 从单一力学特征的刻划向多流变特性方向发展。同时要求模式也要向多级冰厚的方向发展。(2) 尽管对影响海冰的多种作用力已有越来越完善的考虑, 但仍然存在一些未能有效刻划的动力学因素, 要求对这些因素进行深入研究。同时对已有的许多参数化方案尚有不尽人意的地方, 有待进一步改进。(3) 现有模式对冰边缘带、冰间湖或水道的模拟方案还不完善, 需要对发生在这些区域的更为复杂的动力、热力过程作特殊考虑。(4) 发展冰-海耦合模式和冰-海-气耦合模式, 以更好地刻划海洋、海冰与大气之间的相互作用, 最终发展到对海冰所有主要作用因子的恰当刻划和对北极海冰的稳定、可靠的预报。

综上所述, 在未来相当长时间里, 北极冰数值模拟主要工作还应在研制出较好数值模式基础上, 广泛研究各种动力和热力过程, 改进各种参数化方法, 使海冰数值模拟在理论和实践上逐步完善, 进而与海洋和大气模式耦合。

参 考 文 献

- Campbell W J, 1965. The wind-driven circulation of ice and water in a polar ocean, *J Geophys Res*, 70: 3 279—3 301
- Chapman W L, Welch W J, Bowman K P *et al*, 1994. Arctic sea ice variability: Model sensitivities and a multidecadal simulation. *J Geophys Res*, 99(C1):919—935
- Colony R, Pritchard R S, 1975. Integration of elastic-plastic constitutive laws. *AIDJEX Bull* 30: 55—80
- Coon M D, 1980. *Sea Ice Processes and Models*. Washington: University of Washington Press, 12—27
- Ebert E E, Gurry J A, 1993. An intermediate one-dimensional thermodynamic sea ice model for investigating ice-atmosphere interactions. *J Geophys Res*, 98(C6):10 085—10 109
- Fischer H, Lemke P, 1994. On the required accuracy of atmospheric forcing fields for driving dynamic thermodynamic sea ice models. *Geophys Monogr AGU*, 85:373—381
- Flato G M, Hibler W D, 1992. Modeling pack ice as a cavitating fluid. *J Phys Ocean*, 22(6):625—651
- Gray J M N T, Morland L W, 1994. A two-dimensional model for the dynamics of sea ice. *Phil Trans R Soc Lond*, 347(A):219—290
- Gray J M N T, Killworth P D, 1995. Stability of the viscous-plastic sea ice rheology. *J Phys Oceanogr*, 25:971—978
- Hibler W D, 1979. A dynamic thermodynamic sea ice model. *J Phys Ocean*, 9:815—845
- Hibler W D, 1980. Modeling a variable thickness sea ice cover. *Mon Weather Rev*, 108:1 944—1 973
- Hibler W D, Walsh J E, 1982. On modeling seasonal and interannual fluctuations of arctic sea ice. *J Phys Oceanogr*, 12:1 514—1 523
- Hibler W D, Bryan K, 1987. A diagnostic ice-ocean model. *J Phys Oceanogr*, 17:983—1 015
- Holland D M, Mysak L A, Manak D K, 1993. Sensitivity study of a dynamic thermodynamic sea ice model. *J Geophys Res*, 98(C2):2 561—2 586
- Kantha L H, Mellor G L, 1989. A two-dimensional coupled ice-ocean model of the Bering Sea marginal ice zone. *J Geophys Res*, 94:10 924—10 936
- Ledley T S, 1991. Snow on sea ice: competing effects in shaping climate. *J Geophys Res*, 96(D9):17 195—17 208
- Maykut G A, Untersteiner N, 1971. Some results from a time-dependent thermodynamic model of sea ice. *J Geophys Res*, 76: 1 550—1 575
- Oberhuber J M, 1993. Simulation of the Atlantic circulation with a coupled sea ice-mixed layerisopycnal general circulation model. Part I: Model Description. *J Phys Oceanogr*, 23:808—829

- Parkinson C L, Washington W M, 1979. A large - scale numerical model of sea ice. *J Geophys Res*, 84: 311—337
- Parmeter R R, Coon M D, 1973. Mechanical model of ridging in the Arctic sea ice cover. *AIDJEX Bull*, 19: 59—112
- Pollard D, Batteen M L, Han Y - J, 1983. Development of a simple upper - ocean and sea ice model. *J Phys Oceanogr*, 13: 754—786
- Riedlinger S H, Preller R H, 1991. The development of a coupled ice - ocean model for forecasting ice conditions in the Arctic. *J Geophys Res*, 96(C9): 16 955—16 977
- Semtner A J, 1976. A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate. *J Phys Oceanogr*, 6: 379—389
- Semtner A J, 1984. On modeling the seasonal thermodynamic cycle of sea ice in studies of climatic change. *Clim Change*, 6: 27—38
- Semtner A J, 1987. A numerical study of sea - ice and ocean circulation in the Arctic. *J Phys Oceanogr*, 17: 1 077—1 099
- Shen H H, Hibler W D, Lepparanta M, 1987. The role of floe collisions in sea ice rheology. *J Geophys Res*, 92(C7): 7 085—7 096
- Thorndike A S, Rothrock D A, Maykut G A, et al, 1975. The thickness distribution of sea ice. *J Geophys Res*, 80: 4 501—4 513
- Walsh J E, Hibler W D, Ross B, 1985. Numerical simulation of northern hemisphere sea ice variability. *J Geophys Res*, 90: 4 847—4 856
- Washington W M, Semtner A J, Meehl G A, et al, 1980. General circulation experiment with a coupled atmosphere ocean and sea ice model. *J Phys Oceanogr*, 10: 1 887—1 908



A REVIEW OF ARCTIC SEA ICE NUMERICAL MODELS

GUO Zhi - chang, ZHAO Jin - ping

(Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

Abstract Arctic sea ice plays a key role in the global climate system. A sea ice numerical model is useful for forecasting the status and variation of sea ice distribution and its effect on the global climate system, and is an important tool in study of ice drifting, distribution of ice thickness and concentration, and the relevant dynamic and thermodynamic processes. In the past few decades, many kinds of numerical models have been developed for studying the behavior and distribution of arctic ice cover. In this paper, the current development of the arctic sea ice models is reviewed, the main ideas of these models are presented, and the successes and failures of these models in improving understanding of the dynamics and thermodynamics of arctic sea ice are evaluated. At the same time, a large number of works and problems that concern the sea ice, atmosphere, ocean and their interactions, as well as the effects of arctic ice in the global climate system using these models are discussed in detail.

Thermodynamic processes in arctic ice are mainly considered in numerical models of Maykut *et al* (1971), Semtner(1976), Parkinson *et al* (1979), etc, to describe important thermodynamic factors. Meanwhile, great progress of arctic ice models has been made in improving the dynamic description of arctic sea ice behavior by Campbell (1965), Coon (1980), Hibler (1979), etc. Based on the studies mentioned above, Hibler (1980), Walsh (1985), Semtner (1987) and Oberhuber (1993) developed dynamic – thermodynamic models and coupled ocean – ice models for realistic simulation considering dynamic and thermodynamic processes of arctic sea ice. Up to now, the dynamic – thermodynamic ice model can reasonably simulate the drifting pattern, ice cover extent and thickness distribution in arctic ocean. But it is still beyond the ultimate goal to couple these models with atmospheric and oceanic models.

The further improvement on arctic ice model can be expected in the following research directions. (1) The ice model's parameterization schemes for thermodynamic processes are not enough to model these processes in marginal ice zone as well as between water and sea leads, but, we can expect to get further improvement. (2) Developing variable thickness ice models to study the dynamic and thermodynamic effects of varying thickness of the ice cover. (3) Developing more reasonable rheology to improve the modeling of the internal ice stresses. (4) The coupled ocean-ice model can improve the results of calculation on the location of ice edge and other ice cover properties such as mean ice thickness and concentration. Development of air-ice-ocean coupling model will be an important future direction in studying the role of the Arctic in the global climate.

Key words Arctic Sea ice Numerical models

Subject classification number P731