

# CICE 海冰模式中反照率相关参数 对北极海冰模拟的影响\*

储敏<sup>1</sup> 房永杰<sup>1</sup> 张录军<sup>2</sup> 吴统文<sup>1</sup>

CHU Min<sup>1</sup> FANG Yongjie<sup>1</sup> ZHANG Lujun<sup>2</sup> WU Tongwen<sup>1</sup>

1. 中国气象局国家气候中心, 北京, 100081

2. 南京大学大气科学学院, 南京, 210023

1. *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2. *School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China*

2017-02-13 收稿, 2017-12-25 改回.

储敏, 房永杰, 张录军, 吴统文. 2018. CICE 海冰模式中反照率相关参数对北极海冰模拟的影响. 气象学报, 76(3):461-472  
**Chu Min, Fang Yongjie, Zhang Lujun, Wu Tongwen. 2018. Influence of albedo related parameters on the simulation of Arctic sea ice by CICE. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(3):461-472**

**Abstract** The Los Alamos sea ice model CICE5.0 has been coupled to Beijing Climate Center Climate System Model (BCC\_CSM2.0). To evaluate the effects of parameter optimization and improve the model performance on Arctic sea ice simulation, three parameters, including the emissivity, the maximum melting snow grain radius and the reference temperature of snow grain radius, are selected for sensitivity analysis. All numerical experiments are carried out with the ice-ocean model based on the BCC\_CSM2.0 while the atmospheric circulation model is replaced by data model and forcing data are from Coordinated Ocean-ice Reference Experiments (CORE) data set. Results show that the model performance on Arctic sea ice simulation has been satisfactorily improved after the three parameters are tuned. (1) The sea ice thickness increases remarkably not only in the winter but also in the summer and is more comparable with observations. (2) The spatial distribution of summer ice concentration resembles observations better and the simulated sea ice extent significantly improves. Analysis of sea ice mass budget reveals that parameter optimization has enhanced the physics of albedo, which in turn affects the absorption of solar radiation and finally improves the model capability for simulations of sea ice concentration and thickness. However, some problems still remain especially in the simulation of sea ice area in the winter.

**Key words** Climate system model, BCC\_CSM2.0, Arctic sea ice, CICE, Parameter sensitivity

**摘 要** 国家气候中心气候系统模式 BCC\_CSM2.0 最新耦合了美国 Los Alamos 国家实验室发展的海冰模式 CICE5.0, 为试验模式中反照率相关参数的敏感性及其对模拟结果的影响, 提高模式对北极海冰的模拟能力, 选取海冰模式中 3 个主要参数进行了敏感性试验。利用以 BCC\_CSM2.0 耦合框架为基础建立的海冰-海洋耦合模式, 选取 CORE 资料为大气强迫场开展试验, 试验的 3 个参数分别为冰/雪表面反射率、雪粒半径和雪粒半径参考温度。结果表明, 参数取值的不同对北极海冰的模拟有显著的影响, 优化后的取值组合极大提高了模式的模拟能力, 主要表现在: (1) 改善了对北极冬季海冰厚度的模拟, 海冰厚度增大, 与观测资料更为吻合; (2) 显著提高了对北极夏季海冰密集度的模拟能力, 从而模拟的北极海冰范围年际循环与观测更为一致。参数取值的优化改进了模式对海冰反照率的模拟, 进而影响了冰面短波辐射的吸收和海冰表层的融化, 最终提高了模式对海冰密集度和厚度的模拟效果。

\* 资助课题: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506011)、国家重点基础研究计划 973 项目(2015CB953900)。

作者简介: 储敏, 主要从事海冰模式发展和气候变化方面的研究。E-mail: chumin@cma.gov.cn

通讯作者: 房永杰, 主要从事气候系统模式发展和模拟方面研究。E-mail: fangyj@cma.gov.cn

关键词 气候系统模式, BCC\_CSM2.0, 北极海冰, CICE, 参数敏感性

中图法分类号 P461. +6 P435

## 1 引言

海冰隶属于冰冻圈,是地球气候系统的重要组成部分,其通过与大气、海洋的非线性相互作用对区域以及全球的气候有着重大的影响(Walsh, 1983; 武炳义等, 2016)。首先,海冰作为海洋和大气的中间界面,阻隔了海洋与大气的物质及能量交换,特别是在当前大气温室气体浓度快速升高的背景下,极地海洋作为碳汇起着越来越重要的作用(Lovely, et al, 2015; Meier, et al, 2014);其次,海洋表层海水在结冰时析出盐分,而在海冰融化时释放出淡水,从而影响表层海水的密度以及在垂直方向的运动。不仅如此,极地海冰向低纬度海域的漂流引起的淡水输入会改变大洋的温度和盐度。观测和研究表明,北极海冰向北大西洋的输出直接影响着北大西洋北部的深层对流,进而间接影响全球大洋的温盐环流(Levermann, et al, 2007; Jahn, et al, 2013; 丁永建等, 2015)。更为重要的是,由于海冰的反照率远高于海水,海冰使得海洋表面吸收的太阳辐射减少,从而影响海洋表面的热量平衡,而海冰-反照率正反馈机制的作用更凸显了极地海冰在气候系统中的重要性和复杂性(Walsh, 1983; Alexander, et al, 2004; 柏晶瑜等, 2000; 周天军等, 2015)。

正是因为海冰在气候系统中的重要作用,它的存在状态及未来变化趋势受到了广泛的关注和研究。观测发现,北极海冰在近几十年发生了显著的变化(Meier, et al, 2014; Polyak, et al, 2010)。Parkinson等(2008)分析了1979—2006年卫星观测的北极海冰范围和面积资料,结果发现在这28年内北极海冰以 $(45.1 \pm 4.6) \times 10^3 \text{ km}^2/\text{a}$ 的速率在减少。Cavalieri等(2012)进一步分析了1979—2010年的卫星观测资料,结果表明北极海冰的减少速度在不断增大,平均每年约减少 $(51.5 \pm 4.1) \times 10^3 \text{ km}^2$ 。在海冰面积减少的同时,北极海冰的厚度也在显著变薄(Kwok, et al, 2009)。

气候系统模式是研究海冰状态特征演变的重要工具,随着对海冰过程认识的不断深入,模式对海冰及其与其他气候子系统间的相互作用过程有着越来越复杂、深入的刻画,然而尽管如此,目前的气候系统模式却未能很好地模拟出观测到的北极海冰近十年来快速减少的特征(Parkinson, et al, 2006;

Kwok, 2011; Stroeve, et al, 2012)。Stroeve等(2012)分析比较了耦合模式比较计划(CMIP)第3阶段(CMIP3)和第5阶段(CMIP5)对北极海冰的模拟结果,分析表明,CMIP3模式模拟的近几十年北极海冰减少的速度比观测慢,而CMIP5的模拟结果尽管比CMIP3更接近观测,却依然未能模拟出1979—2011年北极海冰面积快速减少的趋势。类似地,邱博等(2015)评估了CMIP5的14个模式模拟的北极海冰的结果,发现尽管大部分模式能够模拟出北极海冰的季节变化特征,但对北极夏季海冰的年际变化趋势依然存在很大的偏差。

因此,目前的气候系统模式对北极海冰的模拟依然存在很大的不确定性,如何改进模式中的相关物理过程、优化模式中的参数配置是模式发展的重要工作。Kim等(2006)用自动微分法(AD)研究了22个热力和动力过程参数对全球海冰模拟的影响,以减小模拟结果和观测资料的误差为目标,得到了一组适合其模式的参数组合;类似地,Miller等(2006)用CICE海冰模式研究了北极海冰对气-冰拖曳系数、冰强度参数和裸冰反照率等3个参数的敏感性;Björk等(2013)用一个一维的大气-海冰-海洋模式研究了海冰反照率参数化方案对海冰厚度的影响,结论表明不同的方案对结果影响较大。最近,Urrego-Blanco等(2016)利用CICE模式分析了模拟的海冰面积、范围和体积对39个模式参数的敏感性,结论指出影响模式结果的主要参数有积雪热传导率、雪粒大小、融池相关参数等。

BCC\_CSM2.0是中国气象局国家气候中心发展的全耦合气候系统模式,该模式参与了CMIP5模式比较计划,为模式评估、气候变化机理分析等提供了大量的试验数据,其中海冰分量模式为SIS(Sea Ice Simulator)(Winton, 2000)。对该模式的评估表明,BCC\_CSM2.0能较好地模拟20世纪全球地面气温和降水等要素的气候平均态和季节变化特征,对未来100年的气候变化预估也与其他CMIP5模式相当(吴统文等, 2014)。然而,其对北极海冰的模拟却存在一定的问题,主要表现在模拟的冬季海冰面积偏大,夏季海冰面积则偏小,厚度相对观测资料显著偏薄,从而海冰面积的年循环振幅偏大(谭慧慧等, 2015)。针对上述问题,房永杰等(2017)进行了相同外强迫下单独海冰模式CICE(Los Alamos sea

ice model) 和 SIS 的比较分析, 结果表明, CICE 相对于 SIS 无论在海冰密集度还是海冰厚度的空间分布上均与观测更为接近, 其原因在于 CICE 模式比 SIS 模式有更完善的物理过程、更精细的参数化方案以及更高的垂直分辨率。因此, 为完善 BCC\_CSM2.0 的海冰分量模式, 提高模式对海冰、极地气候的模拟能力, 在 BCC\_CSM2.0 气候模式系统中耦合了一个新的海冰分量模式 CICE。

CICE 是美国 Los Alamos 实验室发展的全球海冰模式, 具有相对完善的物理过程和复杂的参数化方案, 并包括了海冰模式研究方面的一些最新的成果 (Hunke, et al, 2013)。新过程的引入带来的众多参数的取值有很大的不确定性, 其对模拟结果的影响也需要深入研究, 本研究以 BCC\_CSM2.0 耦合模式框架为基础, 选取 CICE 海冰模式中 3 个与海冰反照率密切相关的参数进行敏感性试验, 以期改进模式对北极海冰的模拟性能, 同时分析影响北极海冰模拟的关键过程和主要参数, 为后续的模式发展提供基础。

## 2 模式和试验

### 2.1 模式介绍

中国气象局国家气候中心于 2005 年开始启动气候系统模式的研发。目前, 最新的耦合模式系统以美国国家大气研究中心 (NCAR) 的耦合器 Coupler 5 (Kiehl, et al, 2004) 为基础, 包含大气模式 BCC\_AGCM2.0 (Wu, et al, 2010)、陆面模式 BCC\_AVIM2.0 (Ji, et al, 2008)、海洋模式 MOM4.0 (Griffies, et al, 2005) 和海冰模式 CICE (Hunke, et al, 2013) 4 个分量模式。本研究采用该耦合模式框架下的海冰-海洋耦合模式, 其中, 海洋模式和海冰模式的水平分辨率相同, 约为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 经向在热带地区加密到  $(1/3)^\circ$ , 海洋模式垂直方向分为 40 层, 最大深度约 5300 m。

海冰分量模式 CICE 是 Los Alamos 实验室 2013 年 9 月发布的 CICE5.0 版本, 其中, 动力学模块采用弹-粘-塑 (Elastic-Viscous-Plastic, EVP) 海冰流变学 (Hunke, et al, 1997) 计算海冰的内部应力, 热力学模块 (Bitz, et al, 1999) 考虑了海冰内部的卤水泡效应, 并对其进行了参数化。为更好地模拟海冰厚度的分布, 模式根据海冰厚度的不同将海冰分为 5 类, 利用海冰厚度机械再分布方案进行不同类别之间的转换, 同时考虑了成脊等过程的影响 (Lipscomb, et al, 2007)。模式包含多个显式的融

池参数化方案, 可以更好地模拟融池的发生、发展和重新冻结的过程, 从而计算出融池的面积和深度, 更准确地模拟大气、海冰和海洋界面的反照率和热量通量; 模式采用了 Delta-Eddington (dEdd) 短波辐射方案 (Briegleb, et al, 2007), 该方案根据实验观测的积雪和海冰的光学属性计算冰和积雪对短波辐射的反射、散射和吸收, 同时包含了冰面融池的影响。在垂直方向上, 模式包含一层积雪, 海冰分为 7 层, 且积雪和海冰的垂直层数可调, 从而可以更好地反映积雪及海冰内部的温度和盐度属性。更多关于模式的介绍可参考 CICE 技术手册 (Hunke, et al, 2013)。

### 2.2 试验设计

一般而言, 模式模拟的偏差来源于外部强迫的偏差以及模式内在物理过程的不足, 海冰模拟的外部强迫包括大气和海洋两个方面。为分离海冰和大气间的反馈过程, 更有针对性地研究海冰模式中参数及相关物理过程对海冰模拟的影响, 参照 Griffies 等 (2009) 提出的海冰-海洋模式参考试验 (CORE) 的方法, 以 BCC\_CSM2.0 为框架, 大气模式采用数据版, 即其从 CORE 强迫场资料集 (Large, et al, 2009) 读取大气强迫场, 主要包括向下长波和短波辐射、降水和降雪、10 m 比湿、海平面气压、10 m 大气温度和风场, 通过耦合器发送给海洋、海冰模式等。资料时段为 1948—2009 年, 共 62 年。

由于 CICE 中参数众多, 而结冰和融化过程主要与大气、海冰间的热量通量有关, 因此, 选取 3 个与辐射及反照率相关的参数进行敏感性试验研究, 3 个参数分别为: 冰雪反射率、雪粒半径和雪粒半径参考温度。其中, 冰雪反射率影响海冰向外发射的长波辐射, 其取值越大, 向外发射的长波辐射也越多; 而雪粒半径及其参考温度会影响模式对海冰反照率的计算, 通常情况下, 雪粒半径越小, 反照率则越大。试验设置和参数取值如表 1 所示, 其中 Run1 为对照试验, Run2—Run4 为参数敏感性试验。将上述试验从相同的初始场由 1948 年开始积分至 2009 年, 最后分析取 1980—1999 年的月平均模拟结果, 以分析参数调试对北极海冰气候态模拟的影响。

表 1 模式试验及参数配置  
Table 1 Experiments and parameters

| 试验名称 | 雪粒半径 ( $\mu\text{m}$ ) | 反射率   | 参考温度 ( $^\circ\text{C}$ ) |
|------|------------------------|-------|---------------------------|
| Run1 | 1500                   | 0.95  | 1.5                       |
| Run2 | 700                    | 0.95  | 1.5                       |
| Run3 | 700                    | 0.985 | 1.5                       |
| Run4 | 700                    | 0.985 | 0.5                       |

使用的观测资料包括:(1)美国国家冰雪数据中心(NSIDC)的海冰范围资料(Comiso, 1999),该资料是利用 SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) 和 SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) 卫星资料反演获得的;(2)英国哈得来中心的海冰密集度资料(Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set, HadISST) (Rayner, et al, 2003);(3)欧洲中尺度天气预报中心(ECMWF)海冰厚度再分析资料(Tietsche, et

al, 2014)。在分析海冰密集度和厚度分布时,采用与模式结果相同的时间范围。

### 3 结果分析

海冰密集度反映海冰的分布范围以及海冰覆盖程度,可以直观地反映动力及热力过程对海冰的影响。因此,对密集度模拟的好坏能直观地反映模式的模拟能力。图 1 给出了 9 月平均海冰密集度分布。9 月是一年中北极海冰面积最小的月份,观测资料

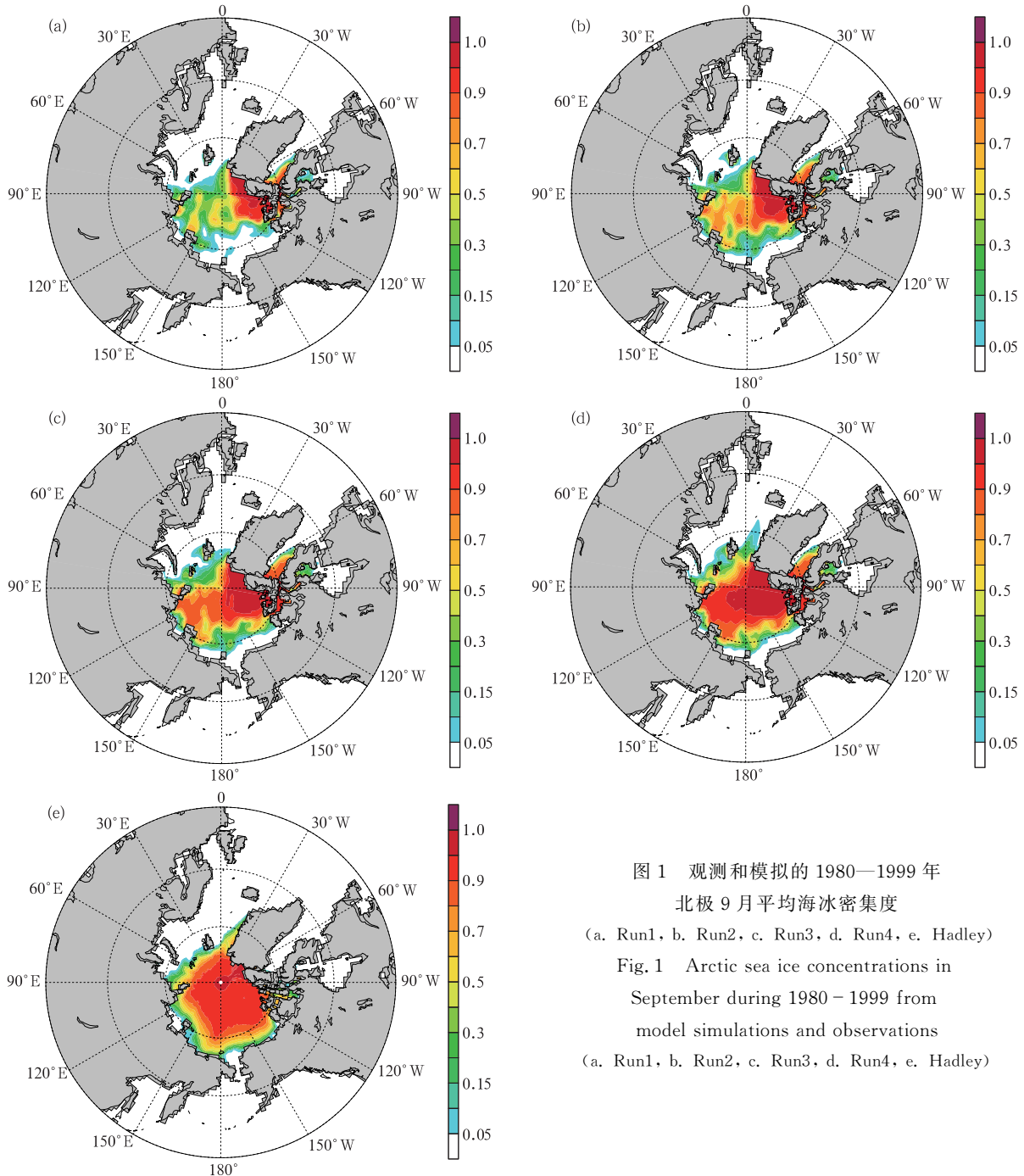


图 1 观测和模拟的 1980—1999 年  
 北极 9 月平均海冰密集度  
 (a. Run1, b. Run2, c. Run3, d. Run4, e. Hadley)  
 Fig. 1 Arctic sea ice concentrations in  
 September during 1980 - 1999 from  
 model simulations and observations  
 (a. Run1, b. Run2, c. Run3, d. Run4, e. Hadley)

显示,此时北极海冰退缩至北冰洋内,海冰密集度大值区位于波弗特海和加拿大北极群岛海域,并沿着经线向欧亚大陆方向减小,其中欧亚大陆沿海和阿拉斯加北侧附近海冰密集度小于 50%,并可见零星无冰海面。对比观测资料,参数取值的优化显著改善了模式的模拟结果。从图 1a 可以看到,对照试验中(Run1)仅有加拿大北极群岛附近海域的海冰覆盖超过了 90%,北冰洋中央区密集度只有 50%左右,因此,密集度严重偏低,海冰面积异常偏小,而且密集度低于 10%的破碎冰区范围偏大。随着参数取值的调整,极大改善了冰面的热量收支,对海冰密集度的模拟也得到了显著的改善,Run4 试验模拟的密集度在分布形态和量值大小上均与观测基本一致。而 3 月属于北半球的冬季,是北极海冰覆盖范围最大的月份,观测资料显示,海冰密集度在北冰洋最大,并随着纬度的降低而减小。不同参数的模拟试验均基本准确地再现了上述海冰密集度的分布特征,但是模拟的海冰范围偏大。对比 4 个试验的结果,参数的调试影响甚小,从差值图(图略)可以看到微小的差异,但不足以影响冬季海冰的分布形态。形成这种结果的原因可能在于,文中调试的参数主要与反照率相关,而冬季北极地区的短波辐射很小,因此,反照率的改变难以影响冬季的海冰范围。Uotila 等(2012)的参数敏感性研究也指出,模拟的海冰厚度相对海冰面积更易受到参数的影响,与此处的结果是一致的。

与密集度相比,海冰厚度对冰面反照率、热量通量等有重要的影响,是衡量海冰状态的又一重要指标。分析模式模拟和 ECMWF 再分析资料的 3 月海冰厚度分布(图 2)可见,再分析资料给出的 3 月北极海冰在格陵兰岛北侧、加拿大海盆以及波弗特海最厚,最大厚度可达 4.5 m;海冰厚度向欧亚大陆逐渐变薄,在西伯利亚沿岸约为 2 m,海冰边缘区厚度较薄,在鄂霍次克海等海域厚度仅约有 0.5 m。4 个试验均能模拟出 3 月海冰厚度的分布特征,但是对照试验(图 2a)中仅在格陵兰岛北侧较小范围内海冰厚度达到 5 m 左右,其他区域则整体上比再分析资料偏薄。随着 3 个参数的不断优化,模式对 3 月海冰厚度的模拟不断改善,Run4 的试验结果基本准确地模拟了海冰厚度的分布特征。因此,尽管参

数取值的调整没有明显地提高模式对冬季海冰密集度的模拟能力(图略),但是改进了对厚度分布的模拟效果。

9 月的海冰厚度分布形态与 3 月类似,均是在加拿大北极群岛附近厚度较大,并且向欧亚大陆方向逐渐变薄(图 3)。4 个试验均能模拟出上述分布特征,但对照试验在整个北极中央区的海冰厚度均低于 0.25 m,而 Run4 达 2—3 m,与再分析资料更为接近。因此,参数取值的调整不但有利于海冰密集度的模拟,也对海冰厚度分布的模拟有积极的意义。然而,对 3 和 9 月海冰厚度的模拟存在一个同样的问题,即加拿大北极群岛附近海域的海冰厚度均比再分析资料偏厚,这可能是由于模式中海陆地形不够精细,导致过多的海冰难以向低纬度流出而堆积所致。

前面给出了 3 和 9 月两个代表性月份的密集度和厚度分布的模拟情况,为了对模式性能有个整体的把握,图 4 给出了模拟和观测的北极海冰范围的年循环,其中海冰范围定义为海冰密集度超过 15%的所有模式网格面积之和。观测显示,海冰范围最大和最小值分别出现在 3 月和 9 月,大小分别为  $15.79 \times 10^6 \text{ km}^2$  和  $7.74 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。模式很好地模拟出了北极海冰范围的季节变化特征,4 个试验模拟的最大海冰范围为  $15.87 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,基本与观测相符。但模拟结果存在两个问题:(1)模式模拟的海冰范围最大值出现在 4 月,比观测晚 1 个月,因此,模式中海冰的融冰期相对实际观测结果少 1 个月,而结冰期偏长;(2)模拟的海冰融化速度偏快,特别是对照试验的结果,导致 9 月海冰范围偏小。总体而言,参数取值的优化极大改善了对夏季海冰范围的模拟效果,而正如上所述,对冬季海冰范围的影响则很小。

从对气候态结果的分析可以看出,模式参数取值的调整极大地改善了对北极夏季海冰范围的模拟,那么,对夏季海冰范围的年际变化的模拟又会如何呢?为此,给出了观测和模拟的 1980—1999 年 9 月北极海冰范围的年际变化曲线(图 5),其中,观测资料是从哈得来海冰密集度资料计算得到的。从图 5 可以看出,Run1 模拟的北极海冰范围在所有年份上均极度偏小,随着参数的调整模拟结果也不断改

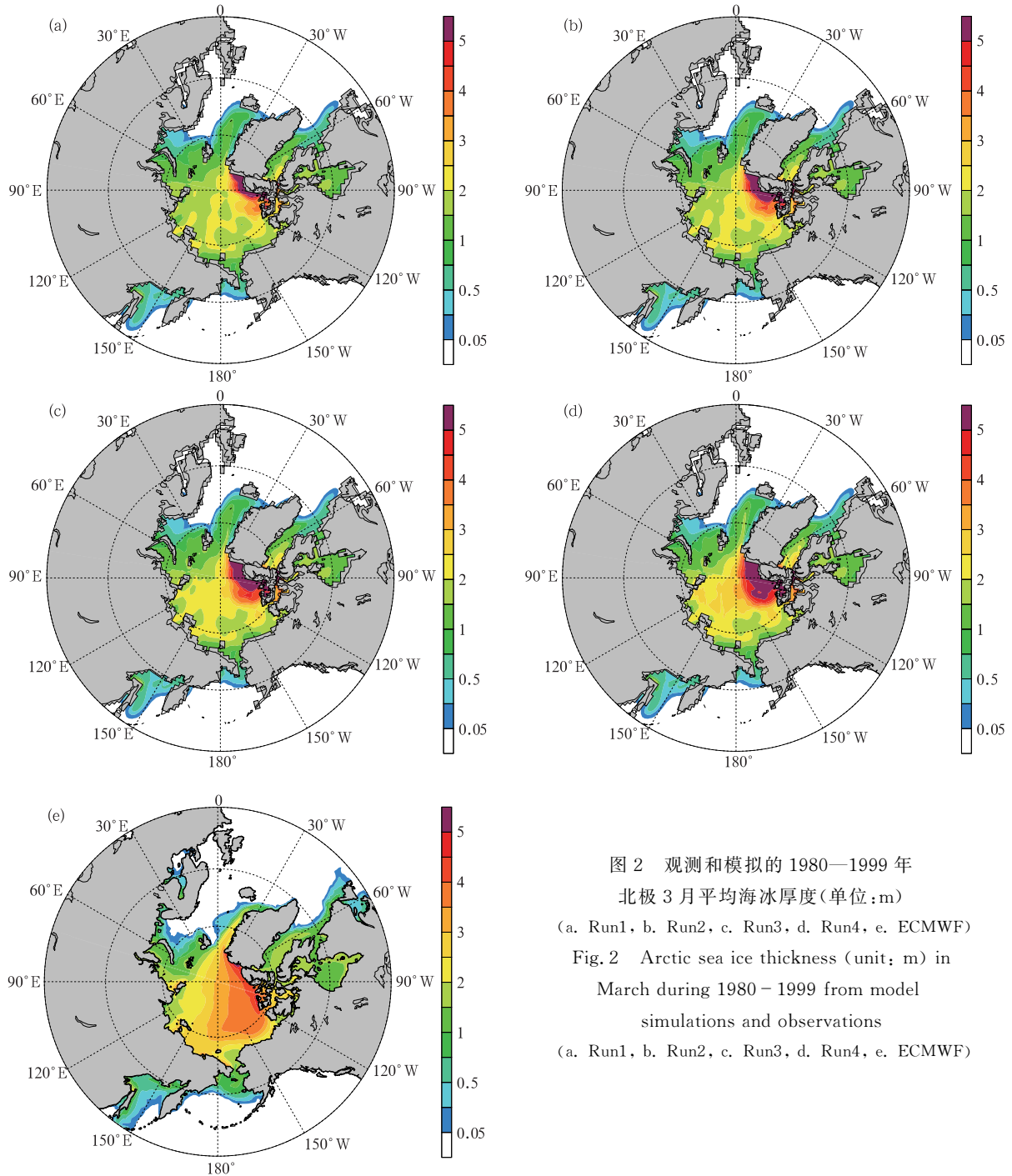


图2 观测和模拟的1980—1999年  
 北极3月平均海冰厚度(单位:m)  
 (a. Run1, b. Run2, c. Run3, d. Run4, e. ECMWF)  
 Fig. 2 Arctic sea ice thickness (unit; m) in  
 March during 1980 - 1999 from model  
 simulations and observations  
 (a. Run1, b. Run2, c. Run3, d. Run4, e. ECMWF)

善,Run4 试验的结果明显优于其他 3 个试验,与观测更为吻合。但也可以发现,观测资料显示 9 月的北极海冰范围有较大的年际变率,而模拟结果则相对稳定。年际变化问题是一个更为复杂的问题,反映了模式对外强迫的敏感性,还需要更多深入的研究。

海冰位于大气和海洋的交界面,因此必然受到大气和海洋的共同影响,相对于动力因素而言,热力过程的影响更为重要。根据观测资料和模拟结果的对比分析,参数取值的优化显著地改善了模拟结果,以下从海冰的冻融情况分析模式改进的原因。

一般而言,海冰的增长可以分为3个部分,分别

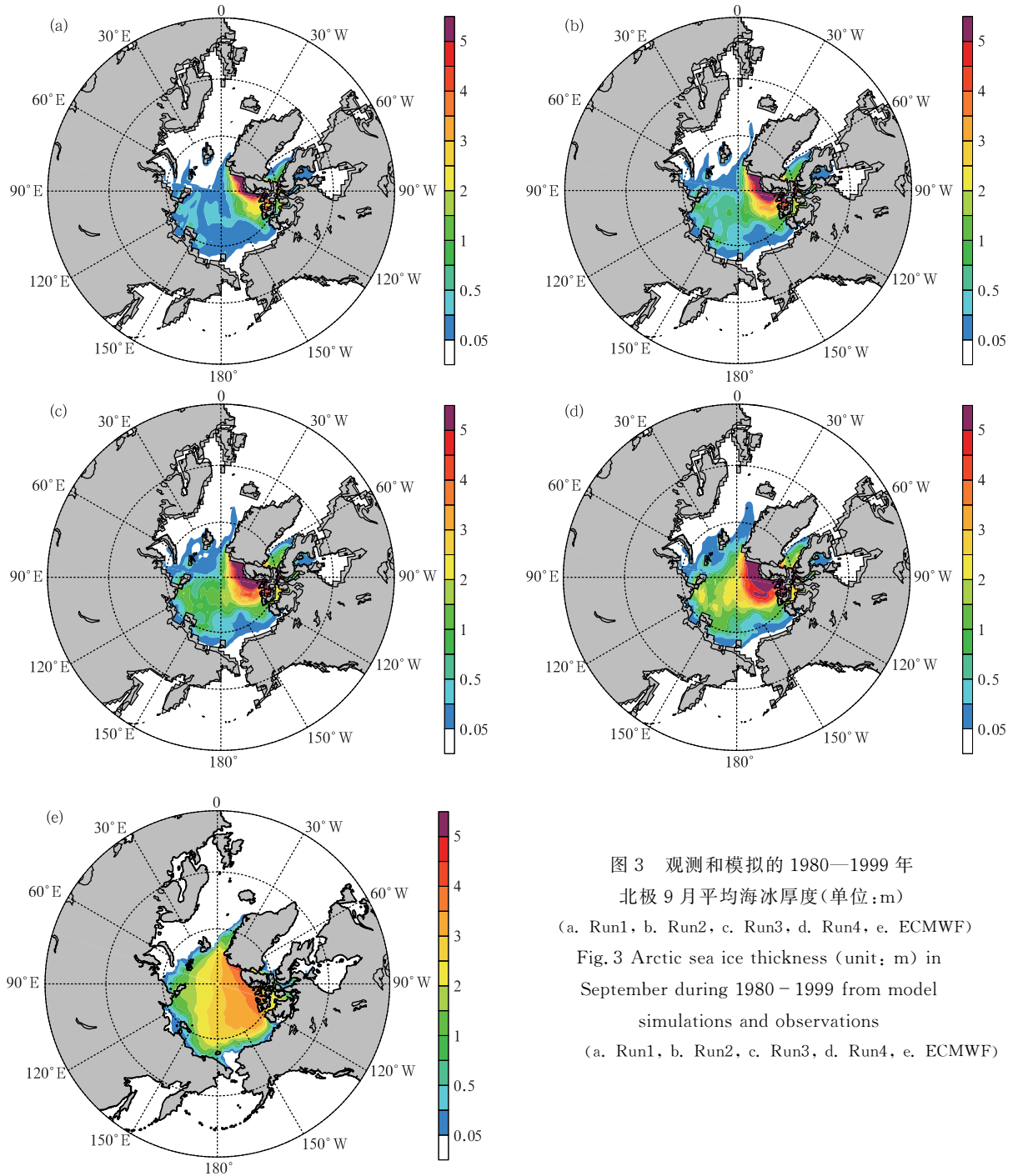


图3 观测和模拟的1980—1999年  
 北极9月平均海冰厚度(单位:m)  
 (a. Run1, b. Run2, c. Run3, d. Run4, e. ECMWF)  
 Fig. 3 Arctic sea ice thickness (unit: m) in  
 September during 1980 - 1999 from model  
 simulations and observations  
 (a. Run1, b. Run2, c. Run3, d. Run4, e. ECMWF)

为海冰底部海水冻结成冰、无冰状态下表层海水的结冰和冰表面积雪转化成的冰,相应地,海冰的融化也包含海冰表面融化、底部融化和侧面融化3个方面,海冰的净增长则为海冰增长与融化的差,单位为cm/month。由于参数优化对海冰范围模拟的改进主要体现在夏季,因此,以下主要对夏季的情况做详细的考察。从北极海冰冻融收支(图6)即净增长的

年循环可以看到,4个试验的主要差别出现在6—8月,亦即海冰融化最多的夏季,其中7月海冰净融化的速度最大,对照试验最快达到98 cm/month。由此可见,文中试验对夏季海冰范围模拟的差异源于夏季海冰融化速度的不同,而参数的优化减缓了夏季海冰的融化速度,使得模拟的夏季北极海冰范围比对照试验更大,与观测更为吻合。

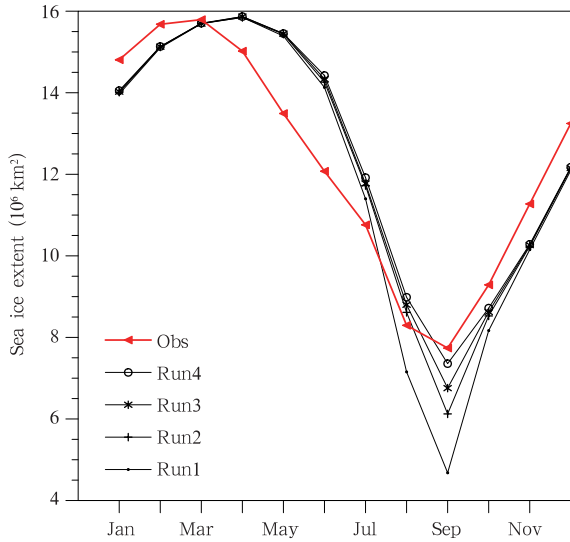


图4 观测和模拟的1980—1999年平均北极海冰范围的年循环

Fig. 4 Annual cycle of mean Arctic sea ice extent during 1980 - 1999 from model simulations and observations

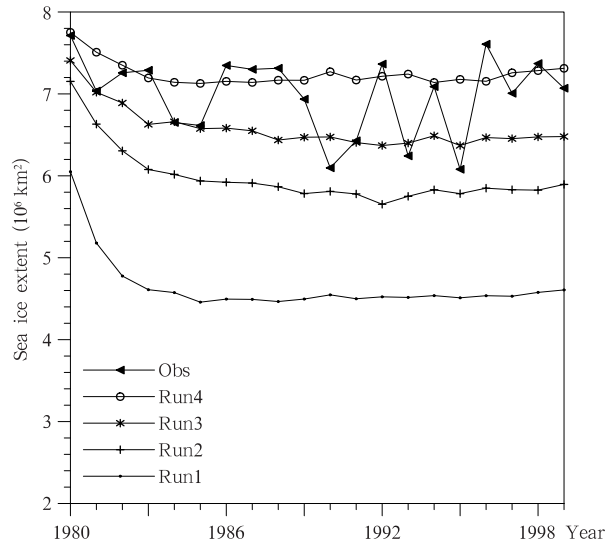


图5 观测和模拟的1980—1999年9月的北极海冰范围

Fig. 5 Arctic sea ice extent in September during 1980 - 1999 from model simulations and observations

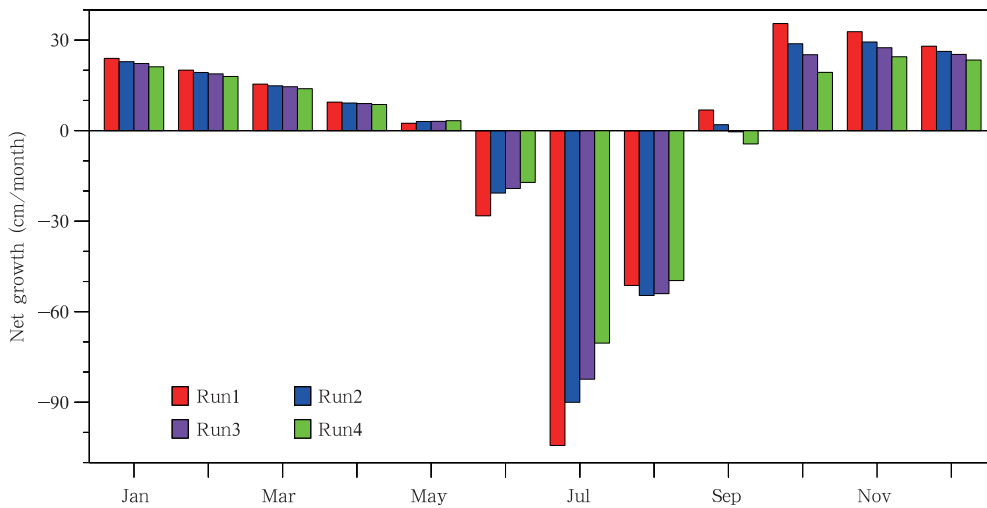


图6 模拟的1980—1999年平均北极海冰冻融收支年循环(单位:cm/month)

Fig. 6 Annual cycle of mean Arctic sea ice mass budget (unit: cm/month) during 1980 - 1999 from model simulations

既然模式模拟的夏季海冰范围的增大源于海冰融化的减少,那么,海冰融化所包含的3个部分中哪一项起着决定性的作用,或者是共同作用的结果?为此,进一步分析了海冰的表面、底部和侧面的融化,结果发现4个试验模拟的底部和侧面的融化差别并不明显(图略),而最大的差别来源于海冰表面的融化(图7)。海冰表面的融化主要发生在5—8

月,而6、7月的差别尤为显著。因此,参数取值的变化影响了海冰表面的能量收支,从而改变了表层海冰的融化速度。

显然,表层海冰的融化与冰面能量收支关系密切。而海冰表面的能量来源有3个方面,分别为向下的净短波辐射、净长波辐射和湍流热通量(包括感热和潜热)。因此进一步比较各项在4个试验中的



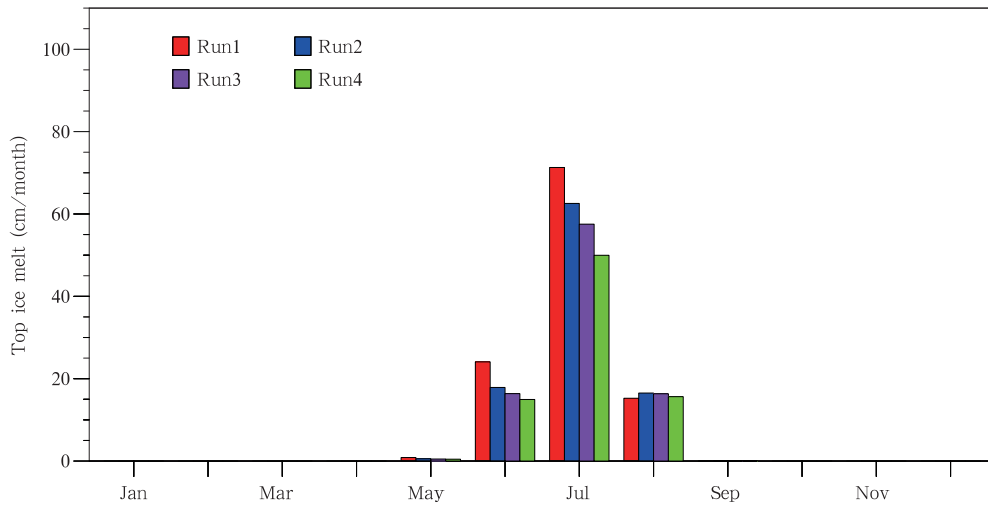


图7 模拟的1980—1999年平均北极海冰表面融化年循环(单位: cm/month)  
 Fig. 7 Annual cycle of mean Arctic sea ice surface melt (unit: cm/month) during 1980 - 1999 from model simulations

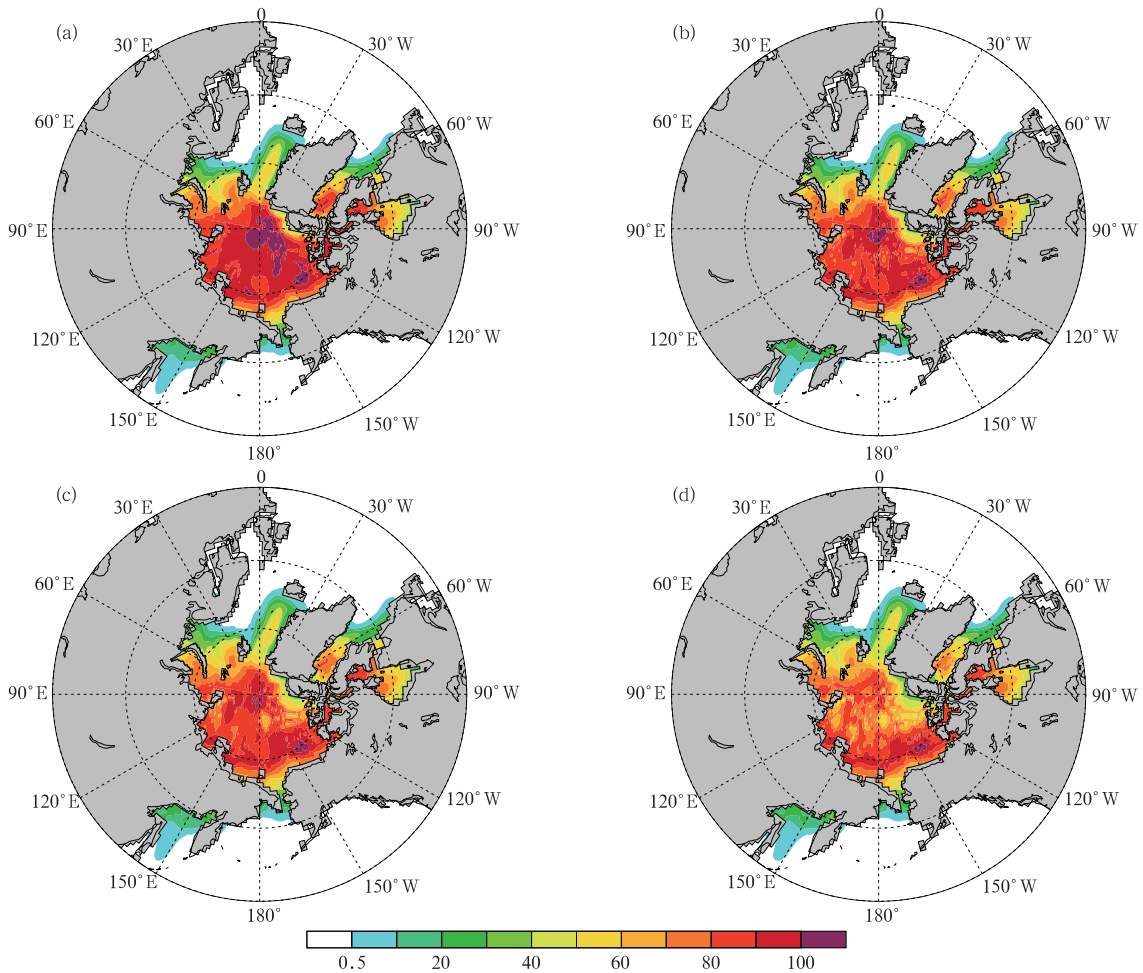


图8 模拟的1980—1999年北极夏季(6—8月)平均冰面净短波辐射通量(单位:  $W/m^2$ )  
 (a. Run1, b. Run2, c. Run3, d. Run4)

Fig. 8 Net downward solar fluxes (unit:  $W/m^2$ ) on ice cover in Jun - Aug during 1980 - 1999 from model simulations  
 (a. Run1, b. Run2, c. Run3, d. Run4)

差异,分析发现,湍流热通量相对于净短波和净长波辐射通量较小,且不同试验间差异不大。同时,由于海冰发射的长波与冰/雪反射率有关,因此,试验中增大冰/雪反射率使得向外的长波辐射增大,导致海冰吸收的净长波辐射减少,从而利于降低冰面温度,促进海冰的冻结。但由于试验中反射率的调整较小,向下净长波辐射也没有太大的差异(图略)。可见,模式中净短波辐射的差异是模式改进的主要原因,从冰面净短波辐射通量和与其密切相关的冰面反照率可以看出,对照试验中冰面净短波辐射通量最大(图 8),在北极点附近超过  $100 \text{ W/m}^2$ ,过量的短波辐射导致了该试验中海冰面积偏小以及厚度偏

薄。而优化了冰面反射率、雪粒半径等参数之后,冰面吸收的短波辐射也相应减少(图 9),其减少的原因正是因为冰面反照率的改进。而改进的原因是因为积雪的反照率与雪粒半径的大小成反相关关系,雪粒半径越大则反照率越低,反之亦然。模式试验对雪粒半径及其参考温度的调整均有利于减小雪粒半径,从而增大反照率。而冰/雪反射率的增大,减小了海冰净吸收的长波辐射,从而海冰温度降低,这同样导致反照率的增大。因此,参数的优化通过影响对反照率的模拟而提高了北极海冰的模拟能力。为了更清晰地表达参数的影响,图 10 给出了参数影响示意。

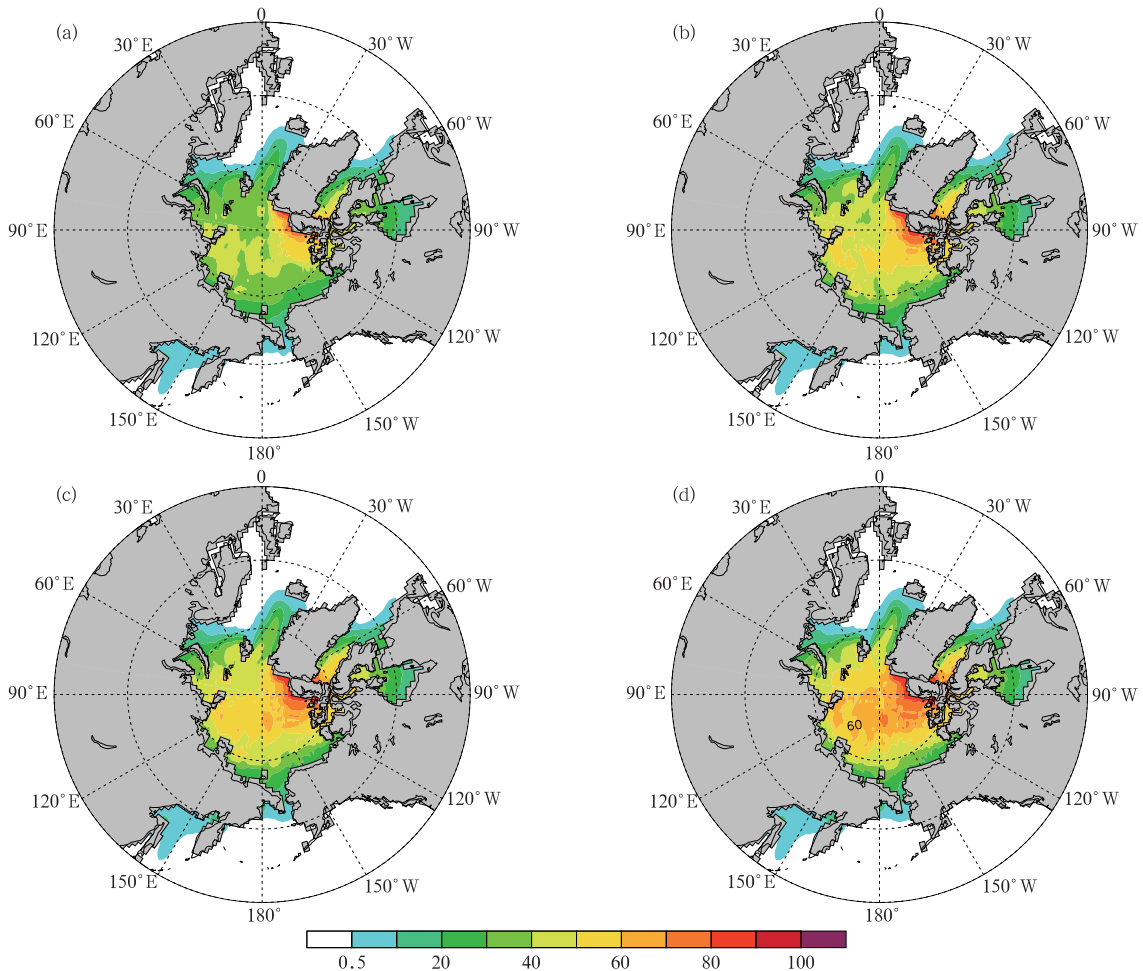


图 9 模拟的 1980—1999 年北极夏季(6—8 月)平均冰面反照率(单位:%)

(a. Run1, b. Run2, c. Run3, d. Run4)

Fig. 9 Ice surface albedo (unit: %) in Jun - Aug during 1980 - 1999 from model simulations

(a. Run1, b. Run2, c. Run3, d. Run4)

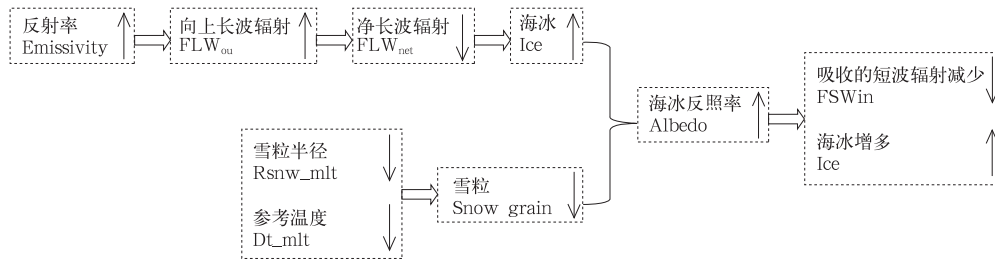


图 10 参数影响示意

Fig. 10 Pathway of effects from parameters

## 4 结 论

以 BCC\_CSM2.0 耦合框架为基础,将海冰模式 CICE5.0 与海洋模式 MOM4.0 进行耦合,利用 CORE 强迫场资料驱动海冰-海洋耦合模式对北极海冰进行了模拟研究。鉴于海冰-反照率正反馈机制是海冰与气候相互作用的主要方式之一,文中选取了 CICE 中 3 个与反照率密切相关的参数进行了敏感性试验研究。在此基础上,对比观测资料对模拟结果进行细致的评估,并分析参数的影响及模式改进的主要原因和机制。

(1)对冰面反射率、雪粒半径及其参考温度的取值进行优化调整后,模式对北极海冰的模拟能力显著提高。相对于对照试验中北极冬季海冰厚度偏薄和夏季海冰面积偏小且厚度偏薄的状况,参数取值调整后模式明显改进了对北极冬季海冰厚度的模拟能力,使得海冰厚度分布及量值大小均与观测符合;更为重要的是,模式对夏季海冰的模拟能力得到了明显的提升,无论是海冰面积,还是海冰的厚度,均与观测更为接近。

(2)从海冰的冻融收支以及能量收支的角度对模式改进的原因和参数取值对模拟结果的影响进行了探讨,结果发现模式对夏季海冰模拟能力的提高在于参数取值的优化导致了海冰反照率的增大,进而使得海冰反射出的太阳辐射增多,海冰吸收的太阳辐射减少,从而海冰表层的融化减少,最终模拟的夏季海冰厚度和范围均增大;在此基础上,冬季海冰厚度也有了很大的改进。

参数优化的试验有利于了解参数在模式改进中的意义,通过对机理的分析,对影响海冰模拟的主要过程有了更深入的了解,从而为后续模式的发展提供了思路和改进方向。然而也需要注意到,在模式模拟能力得到显著提升的同时,其模拟的 3 月海冰密集度与观测还有很大的偏差,特别是在巴伦支海、

喀拉海和格陵兰海以东海域的海冰相对观测偏多,而且,模式对北极海冰范围最大值的模拟也存在一个月的滞后,这些现象的影响因素和解决办法都还有待更深入的研究。

## 参考文献

柏晶瑜,徐祥德,苗秋菊. 2000. 北极海冰“强信号”影响域. 气象学报, 58(4): 485-491. Bai J Y, Xu X D, Miao Q J. 2000. The Arctic sea-ice "strong-signal" region. Acta Meteor Sinica, 58(4): 485-491 (in Chinese)

丁永建,张世强. 2015. 冰冻圈水循环在全球尺度的水文效应. 科学通报, 60(7): 593-602. Ding Y J, Zhang S Q. 2015. The hydrological impact of cryosphere water cycle on global-scale water cycle. Chin Sci Bull, 60(7): 593-602 (in Chinese)

房永杰,储敏,吴统文等. 2017. CICE5.0 与 BCC\_CSM2.0 模式的耦合及对北极海冰的模拟评估. 海洋学报, 39(5): 33-43. Fang Y J, Chu M, Wu T W, et al. 2017. Coupling of CICE5.0 with BCC\_CSM2.0 model and its performance evaluation on Arctic sea ice simulation. Haiyang Xuebao, 39(5): 33-43 (in Chinese)

邱博,张录军,储敏等. 2015. 气候系统模式对于北极海冰模拟分析. 极地研究, 27(1): 47-55. Qiu B, Zhang L J, Chu M, et al. 2015. Performance analysis of Arctic sea ice simulation in climate system models. Chin J Polar Res, 27(1): 47-55 (in Chinese)

谭慧慧,张录军,储敏等. 2015. BCC\_CSM 对全球海冰面积和厚度模拟及其误差成因分析. 大气科学, 39(1): 197-209. Tan H H, Zhang L J, Chu M, et al. 2015. An analysis of simulated global sea ice extent, thickness, and causes of error with the BCC\_CSM model. Chinese J Atmos Sci, 39(1): 197-209 (in Chinese)

武炳义,杨琨. 2016. 从 2011/2012 和 2015/2016 年冬季大气环流异常看北极海冰以及前期夏季北极大气环流异常的作用. 气象学报, 74(5): 683-696. Wu B Y, Yang K. 2016. Roles of Arctic sea ice and the preceding summer Arctic atmospheric circulation anomalies in the atmospheric circulations anomalies of 2011/2012 and 2015/2016 winters. Acta Meteor Sinica, 74(5): 683-696 (in Chinese)

吴统文,宋连春,李伟平等. 2014. 北京气候中心气候系统模式研发进展:在气候变化研究中的应用. 气象学报, 72(1): 12-29. Wu T W, Song L C, Li W P, et al. 2014. An overview on pro-

- gress in Beijing Climate Center climate system model: Its development and application to climate change studies. *Acta Meteor Sinica*, 72(1): 12-29 (in Chinese)
- 周天军, 陈晓龙. 2015. 气候敏感度、气候反馈过程与 2°C 升温阈值的不确定性问题. *气象学报*, 73(4): 624-634. Zhou T J, Chen X L. 2015. The uncertainty in the 2°C warming threshold issue as related to climate sensitivity and climate feedback. *Acta Meteor Sinica*, 73(4): 624-634 (in Chinese)
- Alexander M A, Bhatt U S, Walsh J E, et al. 2004. The atmospheric response to realistic Arctic sea ice anomalies in an AGCM during winter. *J Climate*, 17(5): 890-905
- Bitz C M, Lipscomb W H. 1999. An energy-conserving thermodynamic model of sea ice. *J Geophys Res*, 104(C7): 15669-15677
- Björk G, Stranne C, Borenäs K. 2013. The sensitivity of the Arctic Ocean sea ice thickness and its dependence on the surface albedo parameterization. *J Climate*, 26(4): 1355-1370
- Briegleb B P, Light B. 2007. A Delta-Eddington multiple scattering parameterization for solar radiation in the sea ice component of the community climate system model. NCAR Tech. Note NCAR/TN-472+ STR. 100. Boulder, Colorado; NCAR
- Cavalieri D J, Parkinson C L. 2012. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *Cryosphere*, 6(4): 881-889
- Comiso J C. 1999. Bootstrap sea ice concentrations from NIMBUS-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS, Version 2. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center
- Griffies SM, Gnanadesikan A, Dixon K W, et al. 2005. Formulation of an ocean model for global climate simulations. *Ocean Sci*, 1(1): 45-79
- Griffies S M, Biastoch A, Böning C, et al. 2009. Coordinated ocean-ice reference experiments (COREs). *Ocean Mod*, 26(1-2): 1-46
- Hunke E C, Dukowicz J K. 1997. An elastic viscous plastic model for sea ice dynamics. *J Phys Oceanogr*, 27(9): 1849-1867
- Hunke E C, Lipscomb W H, Turner A K, et al. 2013. CICE: The Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual Version 5.0 LA-CC-06-012. Los Alamos NM; Los Alamos National Laboratory, 115pp
- Jahn A, Holland M M. 2013. Implications of Arctic sea ice changes for North Atlantic deep convection and the meridional overturning circulation in CCSM4-CMIP5 simulations. *Geophys Res Lett*, 40(6): 1206-1211
- Ji J J, Huang M, Li K R. 2008. Prediction of carbon exchanges between China terrestrial ecosystem and atmosphere in 21st century. *Sci China Ser D; Earth Sci*, 51(6): 885-898
- Kiehl J T, Gent P R. 2004. The community climate system model, version 2. *J Climate*, 17(19): 3666-3682
- Kim J G, Hunke E C, Lipscomb W H. 2006. Sensitivity analysis and parameter tuning scheme for global sea-ice modeling. *Ocean Mod*, 14(1-2): 61-80
- Kwok R, Cunningham G F, Wensnahan M, et al. 2009. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008. *J Geophys Res*, 114 ( C7 ): C07005, doi: 10. 1029/2009JC005312
- Kwok R. 2011. Observational assessment of Arctic Ocean sea ice motion, export, and thickness in CMIP3 climate simulations. *J Geophys Res*, 116(C8):C00D05, doi: 10.1029/2011JC007004
- Large W G, Yeager S G. 2009. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set. *Climate Dyn*, 33(2-3): 341-364
- Levermann A, Mignot J, Nawrath S, et al. 2007. The role of northern sea ice cover for the weakening of the thermohaline circulation under global warming. *J Climate*, 20(16): 4160-4171
- Lipscomb W H, Hunke E C, Maslowski W, et al. 2007. Ridging, strength, and stability in high-resolution sea ice models. *J Geophys Res*, 112(C3):C03S91, doi: 10.1029/2005JC003355
- Lovely A, Loose B, Schlosser P, et al. 2015. The gas transfer through polar sea ice experiment: Insights into the rates and pathways that determine geochemical fluxes. *J Geophys Res*, 120(12): 8177-8194, doi: 10.1002/2014JC010607
- Meier W N, Hovelsrud G K, van Oort B E H, et al. 2014. Arctic sea ice in transformation: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity. *Rev Geophys*, 51(3): 185-217, doi: 10.1002/2013RG000431
- Miller P A, Laxon S W, Feltham D L, et al. 2006. Optimization of a sea ice model using basinwide observations of Arctic sea ice thickness, extent, and velocity. *J Climate*, 19(7): 1089-1108
- Parkinson C L, Vinnikov K Y, Cavalieri D J. 2006. Evaluation of the simulation of the annual cycle of Arctic and Antarctic sea ice cover ages by 11 major global climate models. *J Geophys Res*, 111(C7): C07012, doi: 10.1029/2005JC003408
- Parkinson C L, Cavalieri D J. 2008. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2006. *J Geophys Res*, 113(C7):C07003, doi: 10.1029/2007JC004558
- Polyak L, Alley R B, Andrews J T, et al. 2010. History of sea ice in the Arctic. *Quat Sci Rev*, 29(15-16): 1757-1778
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res*, 108(D14):4407, doi: 10.1029/2002JD002670
- Stroeve J C, Kattsov V, Barrett A, et al. 2012. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations. *Geophys Res Lett*, 39(16):L16502, doi: 10.1029/2012GL052676
- Tietsche S, Balmaseda M A, Zuo H, et al. 2014. Arctic sea ice in the ECMWF MyOcean2 ocean reanalysis ORAP5. Tech Rep 737. Reading, UK: European Center for Medium-Range Weather Forecasts
- Uotila P, O'Farrell, Marsland S J, et al. 2012. A sea-ice sensitivity study with a global ocean-ice model. *Ocean Mod*, 51: 1-18
- Urrego-Blanco J R, Urban N M, Hunke E C, et al. 2016. Uncertainty quantification and global sensitivity analysis of the Los Alamos sea ice model. *J Geophys Res*, 121(4): 2709-2732
- Walsh J E. 1983. The role of sea ice in climatic variability: Theories and evidence. *Atmos-Ocean*, 21(3): 229-242
- Winton M. 2000. A reformulated three-layer sea ice model. *J Atmos Oceanic Technol*, 17(4): 525-531
- Wu T W, Yu R C, Zhang F, et al. 2010. The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: Description and its performance for the present-day climate. *Climate Dyn*, 34(1): 123-147