

杨清华, 刘骥平, 张占海, 等. 2011. 北极海冰数值预报的初步研究——基于海冰—海洋耦合模式 MITgcm 的模拟试验 [J]. 大气科学, 35 (3): 473–482. Yang Qinghua, Liu Jiping, Zhang Zhanhai, et al. 2011. A preliminary study of the Arctic sea ice numerical forecasting: Coupled sea ice–ocean modelling experiments based on MITgcm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (3): 473–482.

北极海冰数值预报的初步研究—— 基于海冰—海洋耦合模式 MITgcm 的模拟试验

杨清华^{1, 2} 刘骥平³ 张占海⁴ 吴辉碇¹ 李群⁴ 邢建勇¹

1 国家海洋环境预报中心国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081

2 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012

3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

4 中国极地研究中心, 上海 200136

摘 要 利用最近发展的 MITgcm (麻省理工学院通用环流模式) 海冰—海洋耦合模式, 以 NCEP (美国国家环境预测中心) 再分析资料为大气强迫场进行了 1992 年 1 月至 2009 年 12 月北极海冰数值模拟。结果表明, 此模式能很好地模拟卫星观测的北极海冰季节和年际变化, 具备很好的北极海冰数值模拟能力。以此为基础, 对 2009 年 7 月和 10 月北极海冰消融和增长两个例分别进行了 4 组后报试验研究。试验分别以 NCEP 再分析气候场、NCEP GFS (全球预报系统) 预报资料为大气强迫场, 并采用了两种不同的融合 SSM/I (专用微波成像仪) 海冰密集度的初始化方案。预报结果与 SSM/I 的对比, 以及预报技能分析表明, 此模式具备对北极海冰的短时预报能力。大气强迫场的不同对海冰预报的改善不显著, 而初始化考虑 SSM/I 海冰密集度以减少初始误差的预报能更好地模拟出海冰的消融和增长。此外, 模式模拟的海冰密集度略为偏高, 对海冰冻结过程的模拟能力要优于消融过程。

关键词 北极 海冰—海洋耦合模式 海冰预报

文章编号 1006-9895 (2011) 03-0473-10

中图分类号 P732

文献标识码 A

A Preliminary Study of the Arctic Sea Ice Numerical Forecasting: Coupled Sea Ice – Ocean Modelling Experiments Based on MITgcm

YANG Qinghua^{1, 2}, LIU Jiping³, ZHANG Zhanhai⁴, WU Huiding¹,
LI Qun⁴, and XING Jianyong¹

1 *Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081*

2 *Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012*

3 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

4 *Polar Research Institute of China, Shanghai 200136*

Abstract Based on the forcing from the NCEP (National Centers for Environmental Prediction) reanalysis data for

收稿日期 2010-03-22, 2010-12-20 收修定稿

资助项目 中国科学院“百人计划”, 国家科技支撑计划 2011BAC03B02, 国家自然科学基金资助项目 40930848, 国家重点基础研究发展计划项目 2011CB309704、2006CB403605, 国家高技术研究发展计划 2008AA121704, 公益性行业科研专项 GYHY200806006

作者简介 杨清华, 男, 助理研究员, 主要从事极地环境研究预报。E-mail: yqh@nmefc.gov.cn

通讯作者 刘骥平, E-mail: jliu@lasg.iap.ac.cn

the period 1992 - 2009, the newly developed MITgcm (MIT general circulation model) coupled ice-ocean model shows that the simulated variabilities of the Arctic sea ice extent/area are in good agreement with the observations derived from the SSM/I (Special Sensor Microwave Imager). On the basis of this, the ability of the MITgcm coupled ice-ocean model in forecasting the Arctic sea ice is investigated. Two cases are selected, one is during the melting period and the other is during the freezing period in 2009. Four forecasting experiments are conducted using atmospheric forcing from the NCEP reanalysis data and GFS (Global Forecast System), which use partly and entirely initialized SSM/I sea ice concentrations. The preliminary results show that the model does have the Arctic sea ice forecast capability. It demonstrates that the sea ice forecast is not very sensitive to different atmospheric forcings, whereas initialization using SSM/I sea ice concentrations can much improve the sea ice forecast.

Key words sea ice forecast, ice-ocean coupled model, Arctic

1 引言

近 30 年的观测表明, 北极海冰正在发生快速变化 (Serreze et al., 2007; Comiso et al., 2008)。北极海冰覆盖范围从 20 世纪 70 年代开始减少, 夏季尤为明显 (Stroeve et al., 2008)。进入 21 世纪后, 夏季海冰覆盖范围的减少明显加速, 由每十年减少 3% 增至每十年减少 10% (Stroeve et al., 2007)。同时, 北极海冰厚度也明显变薄, 从 1980 年到 2000 年海冰厚度平均减小了超过 1 m (Rothrock et al., 2008)。北极海冰快速变化及其预测已成为国际上气候变化的焦点问题之一 (王秀成等, 2010)。

伴随北极航道开通可能性的增加, 北极海上活动, 如极地科学考察、极区渔业捕捞、油气资源开发等, 必将愈加频繁。海冰密集度、边缘线位置、厚度等信息的掌握对极地航海活动非常重要。遥感是获取海冰信息的重要手段, 但只能提供历史及当前的海冰分布, 对未来海冰分布和变化的掌握则须借助数值预报。因此, 实现海冰实时预报已成为极地航海保障工作的迫切需要。

近年来, 美国和挪威等环北极国家在极区海冰—海洋耦合模式研究和业务化应用上取得了很大进展。美国海军从 1987 年开始尝试北极海冰实时数值预报, 现已发展了极地海冰业务化数值预报系统 PIPS (Polar Ice Prediction System) 3.0 版, 为极地不同海域提供实时海冰数值预报产品 (Preller et al., 2002)。挪威南森环境和遥感中心 (Nansen Environmental and Remote Sensing Center, NER-SC) 海冰/海洋数值预报系统 TOPAZ (Towards an Operational Prediction system for the North Atlantic European coastal Zones) 不仅为欧洲多家研究

机构用于北大西洋和北极海洋/海冰数值模拟, 并采用集合卡曼滤波同化技术, 实施冰/海洋实时预报 (Bertino and Lisæter, 2008)。我国已陆续开展了 3 次北极科学考察, 对北极海冰的认识和研究水平有了很大提高, 但尚未开展北极海冰业务化数值预报研究。

目前正在进行的全球海洋环流与气候评估 EC-CO2 计划 (Estimating the Circulation and Climate of the Ocean, Phase II) 旨在发展高分辨率海洋—海冰模拟与诊断系统, 特别是提高极地冰—海耦合数值模拟能力 (Menemenlis et al., 2008)。该计划最近发展的 MITgcm (麻省理工学院通用环流模式) 区域海冰—海洋耦合模式已初步应用于极地冰—海耦合模拟研究, 如海冰参数化方案对北极海冰模拟的影响 (Losch et al., 2010), 穿加拿大北极群岛海冰运输的敏感性试验 (Heimbach et al., 2010), 以及南大洋涡尺度海洋状态模拟 (Mazloff et al., 2010) 等。本文首先评估了 MITgcm 区域海冰—海洋耦合模式对北极海冰的模拟能力。以此为基础, 选用不同的大气强迫场和海冰初始化方案, 进行了 4 组北极海冰后报试验研究。

2 模式介绍和模拟评估

2.1 模式简介

本文所用 MITgcm 版本是 checkpoint59p。海洋模式采用 Arakawa C 网格, 具有静力近似、准静力近似和非静力近似的模拟能力 (MITgcm group, 2009)。模式采用有限体积离散方法, 同时提供处理不规则地形的正交曲线坐标系和三角网格, 从而使模式适用于各种地形情况。模式采用的切削网格技术保证通量守恒, 使模拟结果不漂移, 实现年际、年代际等尺度过程的模拟。海冰模式同样采用

Arakawa C 网格, 海冰动力学有弹—粘—塑流变学 (Hunke, 2001) 和粘—塑迭代算法 (Zhang and Hibler, 1997) 两种方案, 本文选用粘—塑迭代方案; 海冰热力学有带有雪盖的“零层” (Zhang et al., 1998) 和“三层” (Winton, 2000) 两个选项, 本文使用“零层”方案。

耦合模式需要的强迫场包括 10 m 风速、2 m 气温和比湿、向下长波和短波辐射、降水、蒸发、河流和冰川径流。冰—海之间双向耦合, 海洋向海冰模块提供表层水温、盐度、流场信息, 而海冰模块则提供海冰密集度、淡水通量、热通量、表面风应力等信息。

模式采用立方体球面网格, 允许区域内相对均匀的格点间距, 同时避免了极点奇异性问题 (Adcroft et al., 2004)。模拟的北极区域如图 1 (见文后彩图) 所示, 开边界取在大西洋和太平洋的 55°N 附近。边界条件采用 ECCO2 (Estimating the Circulation and Climate of the Ocean, Phase II) 全球模拟结果 (Menemenlis et al., 2005), 主要包括位温、盐度、流和海表面高度。北极区域 420×384 个格点, 网格局地正交, 水平网格格距较平均, 平均间距 18 km, 考虑进了主要的北极海峡。海冰和海洋模式采用相同的水平网格。海洋模式垂直方向 50 层, 垂直分辨率从近表面的 10 m 到最大深度 6150 m 处的 450 m。地形数据采用美国国家地球物理数据中心 (NGDC) 的 2'' 全球地貌数据 (ETOPO2; Smith and Sandwell, 1997), 并对地形数据进行了平滑处理, 以适用于耦合模式。开阔水、干冰、湿冰、干雪和湿雪反照率分别选取 0.15、0.88、0.79、0.97 和 0.83, 气—冰、气—海和海—冰拖曳系数分别取值 2.0×10^{-3} 、 8.2×10^{-4} 和 5.4, 海冰强度 2.7×10^4 Pa (Losch et al., 2010)。

海洋初始场采用极地科学中心水文气候场 (PHC) 数据集 (Steele et al., 2001), 海冰初始场引自太平洋—北极冰—海洋模拟和同化系统数据集 (Zhang and Rothrock, 2003), 月平均河口淡水通量基于北极径流数据集 (Lammers et al., 2001)。使用海洋表面通量 (无海冰时) 块体公式 (Large and Pond, 1981), 海洋边界层和对流混合方案 (Bryan and Lewis, 1979), 线性耗散 (Leith et al., 1968) 方法。海洋—海冰耦合模式的积分时间步长

均是 1200 s。

2.2 模拟能力评估

给定初始的海洋—海冰信息后, 使用 1992 年的 NCEP 再分析资料 (每天 4 次, Kalnay et al., 1996) 对 MITgcm 冰—海耦合模式进行了 10 年的循环强迫, 使模拟的海冰和海洋状态基本达到稳定 (图略)。再以模拟结果作为初始场, 从 1992 年 1 月 1 日积分至 2009 年 12 月 31 日。对比 1992~2008 年月平均北极海冰面积模拟和 SSM/I 结果 [Near-Real-Time DMSP SSM/I Daily Polar Gridded Sea Ice Concentrations, NSIDC (Maslanik and Stroeve, 1999), 海冰密集度大于 0.15 的格点计入面积计算], 可以看到模式较好地模拟出了北极海冰的季节和年际变化, 海冰的时空分布型式同 SSM/I 结果比较接近; 1992 年来的海冰面积长期减少趋势同 SSM/I 较为吻合, 并成功模拟出了 2007 年的海冰面积极小值和 2008 年的第二低值 (图略)。同时, 模拟与 SSM/I 的海冰时间序列存在很好的相关 (图 2), 夏季 (6~8 月)、秋季 (9~11 月)、冬季 (12~2 月) 和春季 (3~5 月) 距平的相关系数分别为 0.89、0.95、0.88 和 0.67, 海冰面积最小的 9 月份的距平相关系数为 0.9, 进一步证明模式具备较好的模拟能力。但模拟结果也存在着明显的系统误差, 如冬、夏季模拟的海冰密集度均在一定程度上偏高, 且夏季偏差较大; 北极中央区的海冰密集度过高、层次感不够等 (图略)。这一方面是由非真实的大气强迫导致的误差, 同时说明模式考虑的物理过程仍相对简单, 特别是对夏季热力学消融过程的考虑不够充分, 有待进一步改进。总的来说, 模式具备一定的极地海冰数值模拟能力, 可用来开展北极海冰数值预报试验。

3 北极海冰后报试验

3.1 大气强迫场和海冰初始化

为了检验模式的短时预报能力, 我们以海冰消融和冻结变化较为显著的 2009 年 7 月 15~20 日和 2009 年 10 月 10~15 日为例, 分别设计了 4 组后报试验, 预报时效为 120 h。试验 1 采用 1979~2008 年平均的 NCEP 再分析气候场 (每天 4 次), 试验 2~4 均采用 NCEP GFS (Saha et al., 2006) 大气预报场, 其水平和时间分辨率信息详见表 1。

初始化方面, 试验 1 和试验 2 均以预报开始日

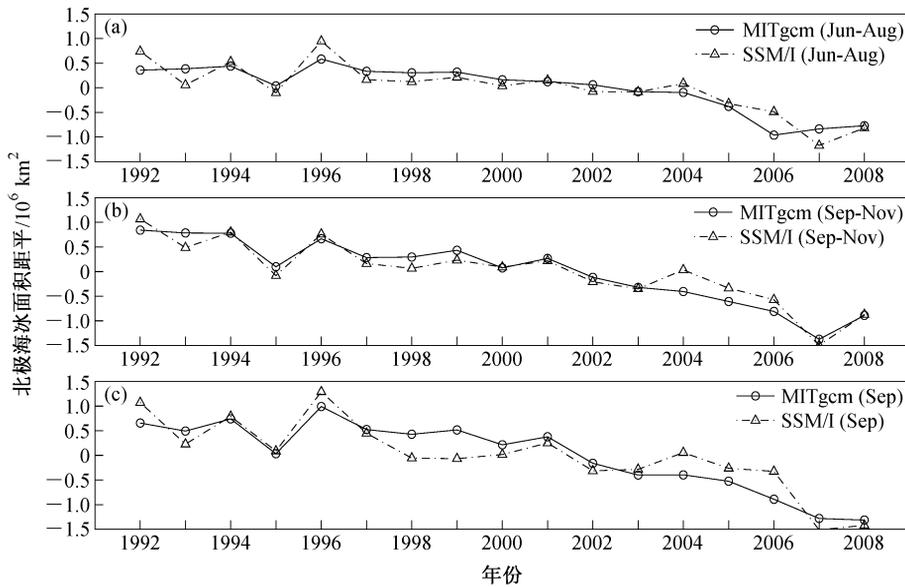


图 2 1992~2008 年北极海冰面积距平(单位: 10⁶ km²) 模拟结果同 SSM/I 比较: (a) 夏季(6~8 月)平均; (b) 秋季(9~11 月)平均; (c) 9 月平均

Fig. 2 The comparison of simulated Arctic sea ice area anomalies (10⁶km²) with the SSM/I anomalies: (a) Summer (Jun - Aug) average; (b) fall (Sep - Nov) average; (c) Sep average

表 1 4 组预报试验的强迫场和初始场比较

Table 1 The atmospheric forcing and initialization for the four forecast experiments

试验名称	大气强迫场	初始场
试验 1	NCEP 再分析气候场 (1979~2008 多年平均, Gauss T62 网格, 约 1.9°×1.9°, 每天 4 次)	模式长期积分结果*
试验 2	NCEP GFS 资料 (1°×1°, 每天 4 次)	模式长期积分结果*
试验 3	NCEP GFS 资料 (1°×1°, 每天 4 次)	基于模式长期积分结果*, 海冰密集度由 SSM/I 部分替代, 冰厚、水温经验调整
试验 4	NCEP GFS 资料 (1°×1°, 每天 4 次)	基于模式长期积分结果*, 海冰密集度由 SSM/I 完全替代, 极点 Cressman 插值, 冰厚、水温经验调整

注: * 指使用 NCEP 再分析资料, 从 1992 年积分至 2009 年的结果。

的长期积分结果作为初始场。试验 3 参考了美国海军数值预报系统 PIPS 2.0 (Preller et al. 2002), 在初始化中考虑进 SSM/I 资料: 将 SSM/I 同模拟结果进行比较, 若 SSM/I 密集度大于 0.8 且两者差别大于 0.1, 或 SSM/I 小于 0.5 且两者差别大于 0.05 时, 将对应格点的模拟密集度替换为 SSM/I 密集度。同时经验调整对应的冰厚、水温场, 以同调整后的海冰密集度相一致 (Preller et al., 2002), 若模拟有冰, SSM/I 无冰, 将冰从模式场中移除, 混合层海温提高 1℃; 若模拟无冰, SSM/I 有冰, 冰厚改为 1.0 m (密集度大于 0.5) 或 0.5 m (密集度小于 0.5), 混合层海温改为海水冻结温度 (模式取为 -1.73℃)。试验 4 则用 SSM/I 资料完全替代了模拟的海冰密集度, 并对极点附近的缺测区域进

行了 Cressman 客观插值 (Cressman, 1959); 相应的冰厚、水温调整方案同试验 3 一致。

以 2009 年 10 月 10~15 日后报试验为例, 图 3 (见文后彩图) 给出了 4 种试验所采用的初值及其比较。相比初始态, 试验 3 (图 3b) 的海冰外缘线显著收缩, 如加拿大海盆、楚科奇海、喀拉海、巴伦支海、格陵兰海, 以及福克斯湾, 但相对 SSM/I (图 3d) 给出的海冰密集度仍明显偏大、区分度低; 试验 4 (图 3c) 完全考虑进了 SSM/I 结果, 并补充了极点附近的海冰信息。

3.2 后报试验结果及分析

图 4a、b 表示两个例的北极海冰面积预报结果及其与分析场 (SSM/I 并对极点附近的缺测区域进行了 Cressman 插值) 的对比。4 个试验均能反映

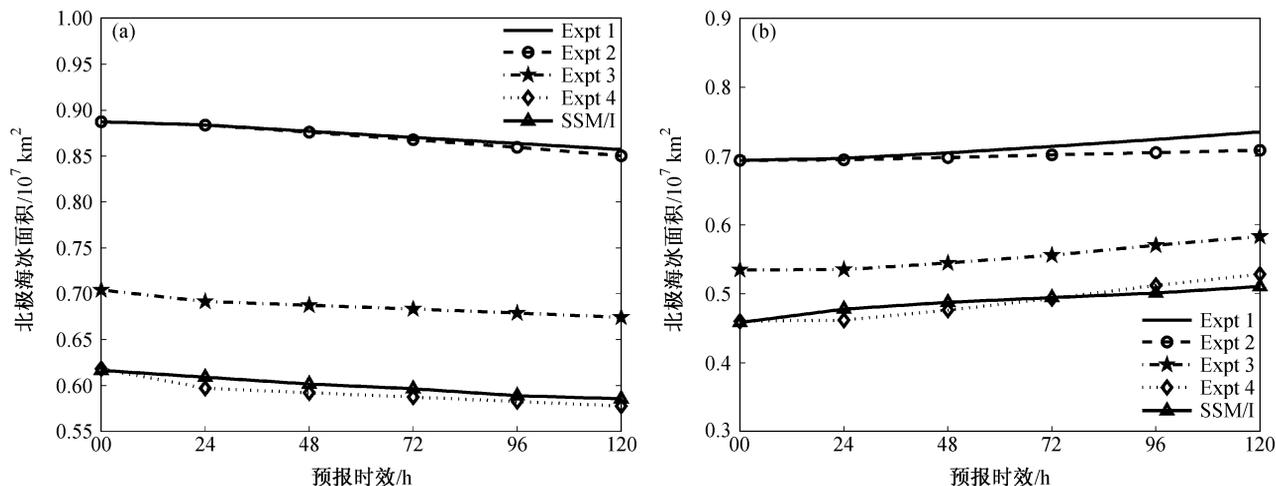


图4 北极海冰面积预报结果同分析场比较 (单位: 10^7 km^2): (a) 2009年7月15~20日; (b) 2009年10月10~15日
 Fig. 4 The Arctic sea ice area comparison between forecasted and analyzed fields. (a) 15-20 Jul 2009; (b) 10-15 Oct 2009

出海冰消融(冻结)趋势,说明模式具备模拟天气尺度海冰变化的能力。两个例的试验1和试验2结果非常接近,随着时间积分,试验2相对试验1有略微改进。考虑到试验1、2大气强迫场的差异,说明大气强迫信息对天气尺度的北极海冰模拟影响不大。两个例的试验3、4结果均明显好于试验1、2,特别是试验4预报结果同SSM/I在数值和变化趋势上都最为接近,说明了初始化方案对于短时海冰预报的重要性。通过完全考虑进海冰初始信息,试验4显著减小了海冰初始场误差,进而改进了预报结果。但也看到,试验4给出的海冰消融/增长速度略微偏快,这表明模式的海冰热力学参数化过程仍有待改进。

图5和图6分别给出两个例120小时后报结果及其与分析场的对比。对于海冰消融个例,由于初始化没有考虑SSM/I资料,试验1和试验2预报的海冰范围明显偏大,特别是西波弗特海、楚科奇海、东西伯利亚海、巴伦支海及哈得孙湾,且密集度明显偏高。与试验1和2相比,初始化中考虑进部分SSM/I信息的试验3对海冰范围的预报有了显著改进,外缘线更接近卫星观测,但预报的海冰密集度仍然偏高。当采用考虑了所有SSM/I信息的初始化后,试验4预报的海冰密集度比试验3有明显改进,但仍存在一定局地偏差,如格陵兰海的海冰外缘线偏南等。

同样,对于海冰冻结个例,试验1和试验2模拟的海冰范围明显偏大、海冰边缘线显著偏南,主

要体现在西波弗特海、楚科奇海、东西伯利亚海、巴伦支海和格陵兰海,密集度预报显著偏高。试验3对海冰外缘线预报有明显改进,但得到的密集度数值仍偏高。试验4预报的外缘线和密集度同SSM/I最为接近,但同样存在一定的局地偏差,如格陵兰海密集度偏高、外缘线偏南,东西伯利亚海密集度偏低、海冰范围偏小。

3.3 预报技能分析

为了进一步评估后报试验结果,以下对各组试验的预报技能进行了分析。预报技能 A (forecast skill) 是预报准确性的度量,预报技能得分 (S , skill scores) 定义为:

$$S = \frac{A_f - A_r}{A_p - A_r}, \quad (1)$$

其中, A_f 、 A_p 、 A_r 分别代表预报系统、完美(无误差)预报、参考预报的预报准确性 (Murphy and Daan, 1985)。引入均方误差 M (Murphy, 1988), 即

$$M(a, b) = N^{-1} \sum_i (a_i - b_i)^2, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

得到:

$$S = \frac{M(f, O) - M(R, O)}{M(P, O) - M(R, O)}, \quad (3)$$

其中, f 和 P 代表预报场和完美预报场, O 和 R 指对应预报时刻的客观分析(或观测)和参考场。由于完美预报的均方误差 $M(P, O)$ 为0, 方程(3)可进一步写为

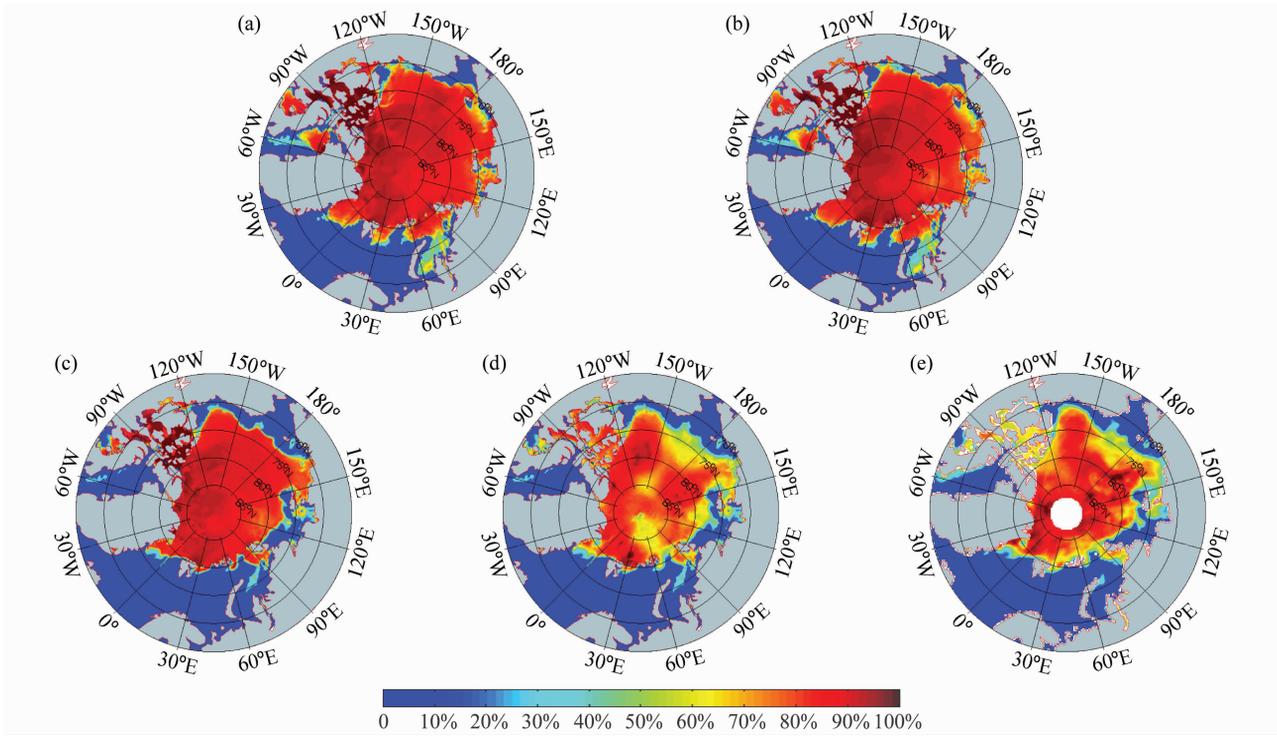


图5 2009年7月20日北极海冰密集度分布：(a) 试验1预报场；(b) 试验2预报场；(c) 试验3预报场；(d) 试验4预报场；(e) SSM/I结果
Fig. 5 The Arctic sea ice concentration on 20 Jul 2009: (a) Forecast in expt 1; (b) forecast in expt 2; (c) forecast in expt 3; (d) forecast in expt 4; (e) SSM/I data

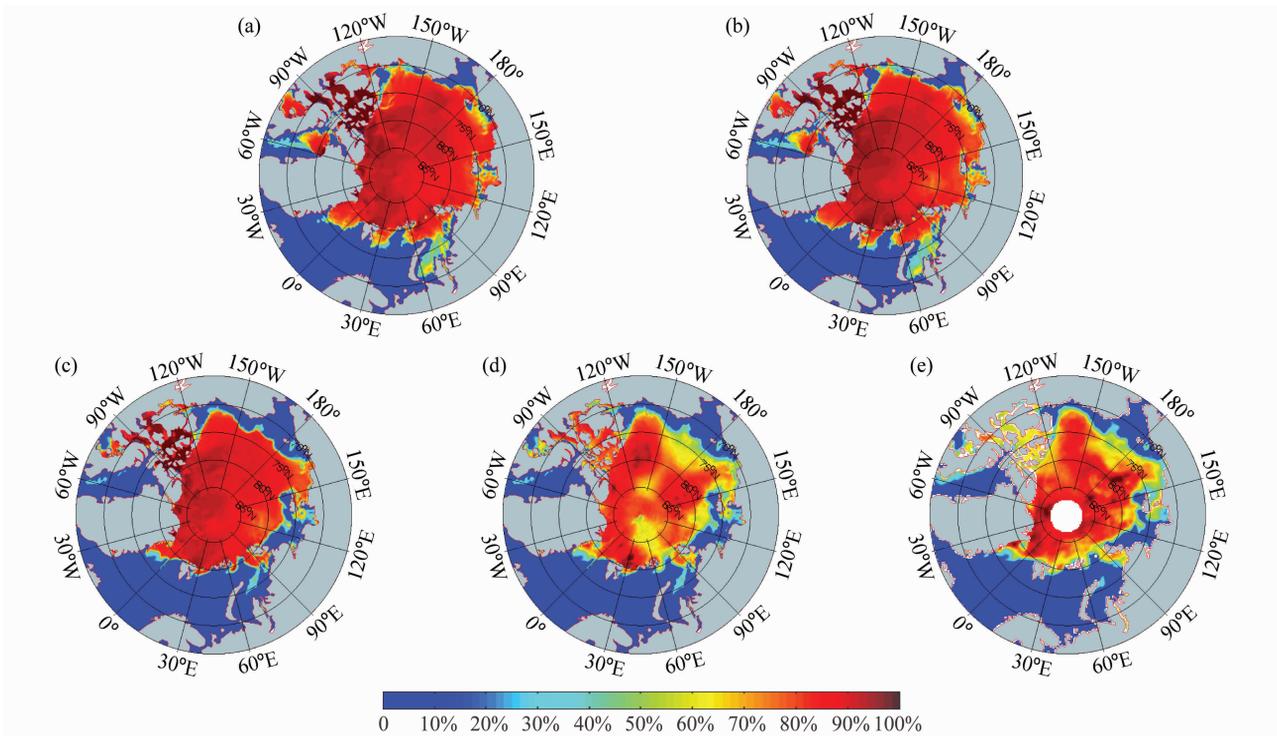


图6 同图5，但为2009年10月15日
Fig. 6 Same as Fig. 5, but for 15 Oct 2009

$$S = 1 - \frac{M(f, O)}{M(R, O)} \quad (4)$$

从公式(4)可得,若参考场均方误差大于(小于)预报场, S 为正(负); $S > 0$ 表示预报优于参考场, $S = 1$ 代表完美预报, $S \leq 0$ 说明无预报技能。 $S \geq 0.36$ 即为相对参考场的有效预报(Hollingsworth et al., 1980)。

定义相对于气候场的预报技能得分(Van Woert et al., 2004)为:

$$S_c(n) = 1 - \frac{M(f_n, O_n)}{M(C_n, O_n)} \quad (5)$$

其中, f_n 指 n 小时预报场 ($n = 24, 48, 72, 96, 120$ h), O_n 和 C_n 分别为相应时间的客观分析场和 1988~2007 年平均的逐日 SSM/I 气候场(Maslanik and Stroeve, 1999)。

表 2 给出了两后报个例相对于 SSM/I 气候场的预报技能得分 S_c 。试验 2 得分略高于试验 1, 但两者所有得分均负, 表明相对气候态没有改进。试验 3 较试验 1、2 的得分有明显提高, 对海冰增长过程的得分为正, 且均高于 0.36, 但对海冰消融过程的预报得分仍为负, 说明试验 3 对冻结过程的预报优于没考虑初始信息的试验 1 和 2, 但不具备对海冰消融过程的预报能力。这主要是由于试验 3 的初始化调整主要集中在海冰边缘格

点, 海冰密集度在 0.5~0.8 的初始误差对预报准确性的影响仍较大。试验 4 的得分最高, 两个例的 24~120 h S_c 预报得分多在 0.80 以上, 均显著高于 0.36, 表明试验 4 的预报结果相对试验 3 具有明显的改进。各试验对海冰增长过程的预报得分 S_c 均高于消融过程, 表明模式对海冰冻结过程的模拟优于消融过程。

为了进一步度量预报准确性, 将参考预报场设为初始的海冰分析场, 且不随时间变化, 引入相对于惯性预报(persistence)的预报技能得分 S_p (Van Woert et al., 2004):

$$S_p(n) = 1 - \frac{M(f_n, O_n)}{M(O_0, O_n)} \quad (6)$$

其中, $S_p(n)$ 指相对于惯性预报的技能得分, O_0 指初始的海冰分析场。

表 3 所示, 各试验的 S_p 相对 S_c 得分均有明显下降, 试验 1~3 的 S_p 得分均为负, 消融个例中试验 1、2 的 120 h S_p 得分低于 -7.0, 试验 3 的 120 h S_p 得分也低于 -1.0, 表明试验 1~3 相对于以初始时刻海冰分析场为参考场的惯性预报没有改进。试验 4 除消融个例的 24 h 得分为 -0.61, 其它得分均为正, 且基本高于 0.36, 表明试验 4 相对惯性预报有显著改进。此外, 表 3 也显示各试验的冻结过程得分明显高于消融过程, 表明 MITgcm

表 2 24~120 h 预报技能 S_c 得分

Table 2 The 24 - 120 h forecast skill scores S_c

试验名称	2009年7月15日					2009年10月10日				
	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h
试验 1	-4.28	-4.33	-4.48	-4.83	-5.66	-1.11	-1.06	-0.99	-0.94	-0.95
试验 2	-4.27	-4.32	-4.43	-4.75	-5.49	-1.09	-1.00	-0.88	-0.77	-0.72
试验 3	-0.58	-0.66	-0.74	-0.91	-1.18	0.45	0.46	0.44	0.40	0.37
试验 4	0.77	0.81	0.82	0.87	0.81	0.85	0.89	0.99	0.90	0.85

表 3 24~120 h 预报技能 S_p 得分

Table 3 The 24 - 120 h forecast skill scores S_p

试验名称	2009年7月15日					2009年10月10日				
	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h
试验 1	-36.09	-17.58	-12.73	-8.96	-7.78	-10.22	-6.36	-5.04	-4.19	-3.27
试验 2	-36.06	-17.51	-12.61	-8.80	-7.56	-10.11	-6.13	-4.70	-3.75	-2.76
试验 3	-10.13	-4.79	-3.36	-2.27	-1.87	-1.94	-0.93	-0.69	-0.62	-0.38
试验 4	-0.61	0.35	0.55	0.77	0.75	0.18	0.62	0.96	0.74	0.66

模式对海冰消融过程的模拟不够准确,有必要对模式消融过程的热力学过程做进一步改进。预报技能分析验证了初始化中数据融合的重要性,考虑进 SSM/I 资料的海冰预报可减少初始误差,提高预报准确性。

4 结论和讨论

本文利用最近发展的 MITgcm 海冰—海洋耦合模式进行了北极海冰数值模拟和后报试验。结果表明:

(1) 此模式能够很好地模拟出观测的北极海冰的季节和年际变化,特别是模拟与观测的海冰时间序列存在很好的相关。因此,该模式具有很好的北极海冰数值模拟能力。

(2) 以此为基础,结合 2009 年 7 月 15~20 日和 10 月 10~15 日北极海冰较为明显的消融和增长个例,分别采用不同的大气强迫场和初始化条件进行了 4 组后报试验研究,进一步验证了模式具备对北极海冰的短时预报能力。后报试验表明:大气强迫场的不同对海冰预报的改善不显著,而初始化考虑 SSM/I 海冰密集度以减少初始误差的预报能更好地预报出海冰的消融和增长。

但模拟和后报试验结果也显示模式模拟的海冰密集度略为偏高,海冰消融过程比冻结过程的预报得分相对偏低。

针对上述问题,我们将在今后进行以下方面的研究:

(1) 大气强迫场。试验 1 采用了 NCEP 再分析气候场资料,试验 2 采用了实时的 NCEP GFS 预报资料,但两者的模拟结果接近,试验 2 并未取得明显优于试验 1 的模拟结果。这表明模式对大气强迫变化的响应不是很显著。一种可能性是本文从海冰变化角度选择了海冰消融和增长比较明显的个例,而非典型的天气变化个例;另一种可能性是本文采用的大气强迫场水平分辨率相对较低(1°),不能为冰—海耦合模式提供较小尺度的大气强迫信息,从而在一定程度上影响了冰—海耦合模式(18 km)对大气强迫的响应。下一步,我们将选择典型的天气过程个例来研究模式对大气强迫的响应,并尝试使用更高分辨率的 Polar-WRF 大气模式预报产品作为大气强迫场。

(2) 海冰—海洋初始场。试验 3、4 的预报结

果相对试验 1、2 有显著地改善,说明采用 SSM/I 观测资料减小初始误差,能够有助于模拟出天气尺度的海冰消融和增长。但目前考虑进的海冰信息仅限于海冰密集度,而对冰厚、海温的调整相对简单。应采用更合理的海冰—海洋经验关系进行初始化处理,并考虑进海冰运动信息。

(3) 模式物理参数化。此模式海冰热力学参数化过程相对简单,如:海冰和积雪反照率为常数且相对偏大,没有很好地反映出冰、雪下垫面的物理属性。同时,模式没有考虑融化期占比例很高的融池和冰间水道的影响,导致模式不能准确反映融化期海冰反照率的正反馈机制,进而无法准确模拟海冰的消融过程。

致谢 ECCO2 计划发展的冰—海耦合模式为预报工作的开展提供了平台,在此表示衷心感谢。

参考文献 (References)

- Adcroft A, Campin J M, Hill C, et al. 2004. Implementation of an atmosphere-ocean general circulation model on the expanded spherical cube [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (12): 2845–2863.
- Bertino L, Lisæter K A. 2008. The TOPAZ monitoring and prediction system for the Atlantic and Arctic Oceans [J]. *J. Oper. Oceanogr.*, 1 (2): 15–18.
- Bryan K, Lewis L J. 1979. A water mass model of the world ocean [J]. *J. Geophys. Res.*, 4: 2503–2517.
- Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. 2008. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L01703, doi: 10.1029/2007GL031972.
- Cressmann G P. 1959. An operational objective analysis system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 87: 367–374.
- Heimbach P, Menemenlis D, Losch M, et al. 2010. On the formulation of sea-ice models. Part 2: Lessons from multi-year adjoint sea-ice export sensitivities through the Canadian Arctic Archipelago [J]. *Ocean Model.*, 33: 145–158.
- Hollingsworth A, Arpe K, Tiedtke M, et al. 1980. The performance of a medium-range forecast model in winter—Impact of physical parameterizations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 108: 1736–1773.
- Hunke E C. 2001. Viscous-plastic sea ice dynamics with the EVP model: Linearization issues [J]. *J. Comput. Phys.*, 170: 18–38.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–471.
- Lammers R B, Shiklomanov A I, Vörösmarty C J, et al. 2001. Assessment of contemporary Arctic river runoff based on observational discharge records [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D4):

- 3321–3334.
- Large W G, Pond S. 1981. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 11: 324–336.
- Leith C E. 1968. Diffusion approximation for two-dimensional turbulence [J]. *Phys. Fluids*, 11: 671–673.
- Losch M, Menemenlis D, Campin J-M, et al. 2010. On the formulation of sea-ice models. Part 1: Effects of different solver implementations and parameterizations [J]. *Ocean Modelling*, 33: 129–144.
- Maslanik J, Stroeve J. 1999. Near-Real-Time DMSP SSM/I Daily Polar Gridded Sea Ice Concentrations [DP/OL]. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. Digital media, http://nsidc.org/data/docs/daac/nsidc0081_ssmi_nrt_seaice.gd.html.
- Mazloff M R, Heimbach P, Wunsch C. 2010. An eddy-permitting Southern Ocean state estimate [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 40: 880–899.
- Menemenlis D, Hill C, Adcroft A, et al. 2005. NASA supercomputer improves prospects for ocean climate research [J]. *Eos Trans. AGU*, 86 (9): 89, doi: 10.1029/2005EO090002.
- Menemenlis D, Campin J-M, Heimbach P, et al. 2008. ECCO2: High resolution global ocean and sea ice data synthesis [J]. *Mercurator Ocean Quarterly Newsletter*, 31: 13–21.
- MITgcm Group. 2009. MITgcm Release 1 Manual [R]. http://mitgcm.org/sealion/online_documents/manual.html [2009-06-03].
- Murphy A H, Daan H. 1985. Forecast evaluation [M]//Probability, Statistics and Decision Making in the Atmospheric Sciences. Westview Press, 379–437.
- Murphy A H. 1988. Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116: 2417–2424.
- Preller R H, Posey P G, Maslowski W, et al. 2002. Navy sea ice prediction systems [J]. *Oceangraphy*, 15 (1): 44–56.
- Rothrock D A, Percival D B, Wensnahan M. 2008. The decline in arctic sea-ice thickness: Separating the spatial, annual, and inter-annual variability in a quarter century of submarine data [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, C05003, doi: 10.1029/2007JC004252.
- Saha S, Nadiga S, Thiaw C, et al. 2006. The NCEP climate forecast system [J]. *J. Climate*, 19: 3483–3517.
- Serreze M C, Holland M M, Stroeve J. 2007. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover [J]. *Science*, 315: 1533–1536.
- Smith W H F, Sandwell D T. 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings [J]. *Science*, 277: 1957–1962.
- Steele M, Morley R, Ermold W. 2001. A global ocean hydrography with a high-quality Arctic Ocean [J]. *J. Climate*, 14: 2079–2087.
- Stroeve J, Holland M M, Meier W, et al. 2007. Arctic sea ice decline: Faster than forecast [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09591, doi: 10.1029/2007GL029703.
- Stroeve J, Serreze M, Drobot S, et al. 2008. Arctic sea ice extent plummets in 2007 [J]. *Eos, Trans. AGU*, 89: 13.
- Van Woert M L, Zou C Z, Meier W N, et al. 2004. Forecast verification of the Polar Ice Prediction System (PIPS) sea ice concentration fields [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 21: 944–957.
- 王秀成, 刘骥平, 俞永强, 等. 2010. 海冰模式 CICE4.0 与 LASG/IAP 气候系统模式的耦合试验 [J]. *大气科学*, 34 (4): 780–792. Wang X C, Liu J P, Yu Y Q, et al. 2010. Experiment of coupling sea ice model CICE4.0 to LASG/IAP climate system model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (4): 780–792.
- Winton M. 2000. A reformulated three-layer sea ice model [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17 (4): 525–531.
- Zhang J, Hibler III W D. 1997. On an efficient numerical method for modeling sea ice dynamics [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (C4): 8691–8702, doi: 10.1029/36JC03744.
- Zhang J, Hibler III W D, Steele M, et al. 1998. Arctic ice—ocean modeling with and without climate restoring [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 28: 191–217.
- Zhang J L, Rothrock D A. 2003. Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131 (5): 845–861.

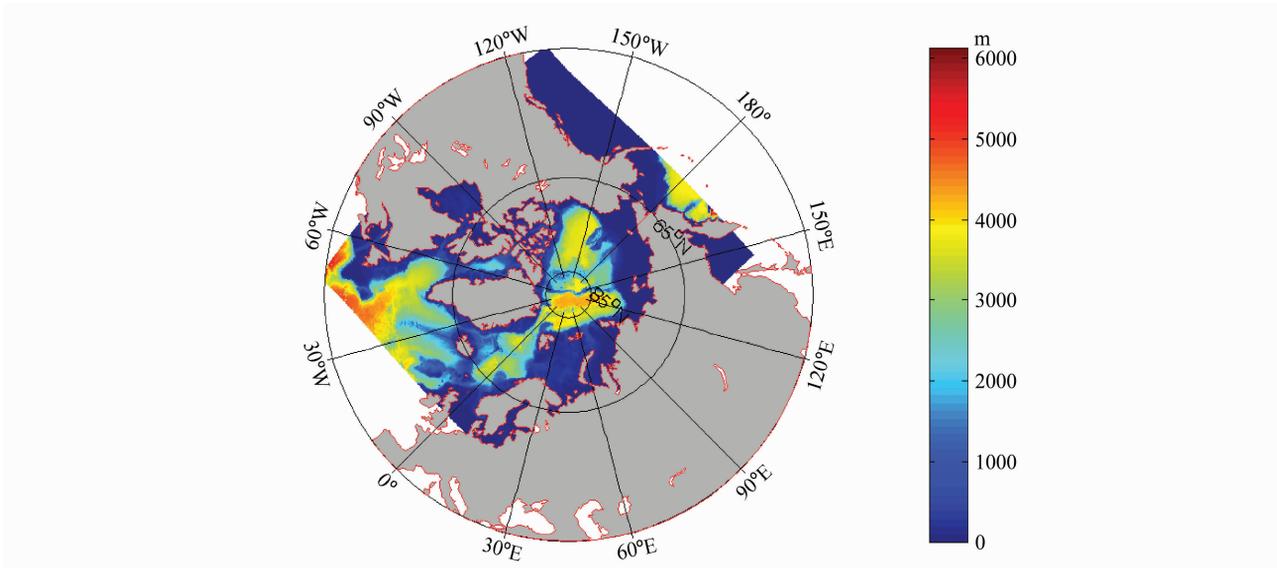


图1 模式计算区域和深度 (单位: m)
Fig. 1 Bathymetry and boundaries of the Arctic domain in the model

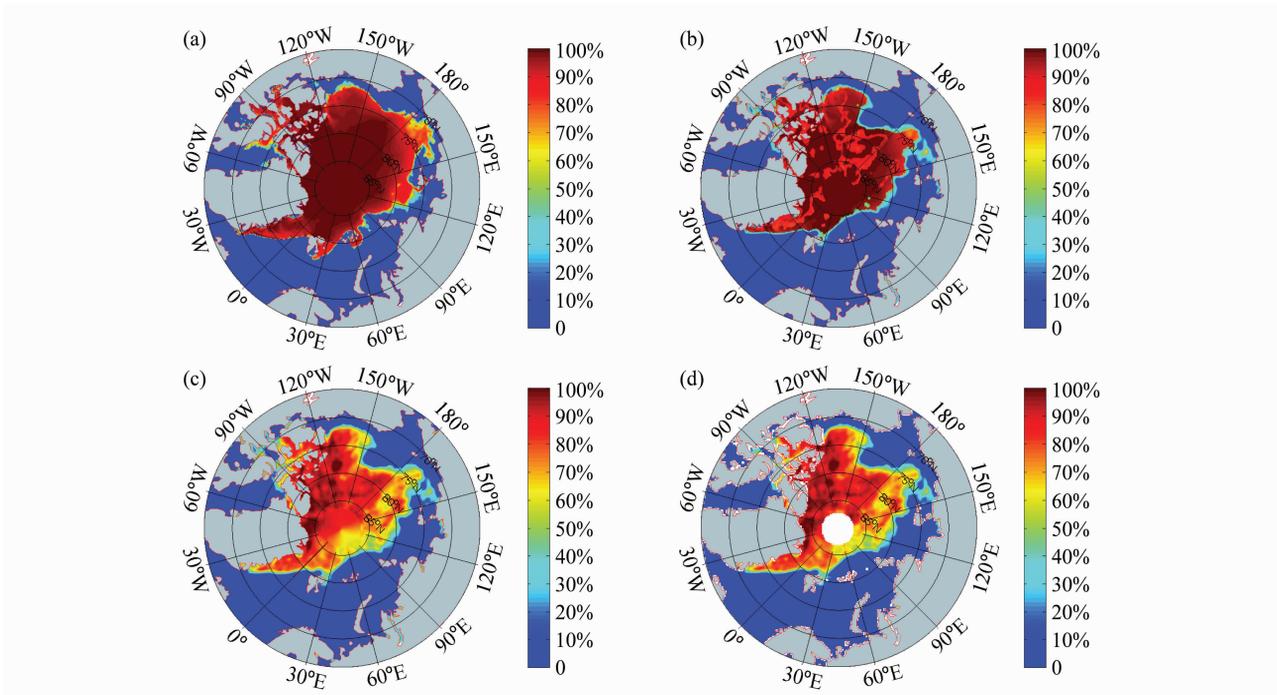


图3 2009年10月10日北极海冰密集度分布: (a) 试验1和试验2初值; (b) 试验3初值; (c) 试验4初值; (d) SSM/I结果
Fig. 3 The Arctic sea ice concentration on 10 Oct 2009; (a) The initialized results in expts 1 and 2; (b) the initialized result in expt 3; (c) the initialized result in expt 4; (d) SSM/I data