

# FGOALS-g1.1 极地气候模拟<sup>\* 1</sup>

王秀成<sup>1,2</sup> 刘骥平<sup>1</sup> 俞永强<sup>1</sup> 刘海龙<sup>1</sup> 李立娟<sup>1</sup>  
WANG Xiucheng<sup>1,2</sup> LIU Jiping<sup>1</sup> YU Yongqiang<sup>1</sup> LIU Hailong<sup>1</sup> LI Lijuan<sup>1</sup>

1. 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

2. 中国科学院研究生院,北京,100049

1. LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2008-05-12 收稿,2009-04-02 改回.

**Wang Xiucheng, Liu Jiping, Yu Yongqiang, Liu Hailong, Li Lijuan. 2009. Polar climate simulation in FGOALS-g1.1. Acta Meteorologica Sinica, 67(6):961-972**

**Abstract** The polar climate simulations (with emphasis on sea ice) in the latest version of LASG climate system model (FGOALS-g1.1) were evaluated using a variety of observational data. The results show that FGOALS-g1.1 does a reasonable job in simulating primary characteristics of the Arctic and Antarctic sea ice, including spatial distribution, seasonal variation, and decadal trend. However, some discrepancies are noteworthy. (1) FGOALS-g1.1 produces more (less) total sea ice area in the Arctic (Antarctic) as compared to the observations. In the Arctic, there is excessive (insufficient) ice cover in north Atlantic all year long, and in east Siberia Sea (Beaufort Sea) in summer. In the Antarctic, there is insufficient ice cover in the Weddell and Ross Seas in winter. Extremely large area with small ice concentration is found far beyond the sea ice edge zone in both the Arctic and Antarctic, particularly in summer. (2) The simulated sea ice velocity is systematically too large as compared to the observations, mainly near the sea ice edge in both the Arctic and Antarctic as well as near Antarctic coastal regions. In the Arctic, the model can not capture the Beaufort Gyre, and produce unrealistic ice motion and thickness distribution around the North Pole due to the inappropriate way to handle the North Pole. Biases in sea ice simulations identified here are closely associated with how well the simulations are in atmosphere and ocean components of FGOALS-g1.1. Further analyses show that weak Icelandic Low and Antarctic Circumpolar Westerly simulated in FGOALS-g1.1 partly contribute to the aforementioned biases in sea ice simulations through influencing atmospheric and oceanic poleward heat transport. Additionally, the amplification of biases in the subcomponent of FGOALS-g1.1 due to atmosphere-sea ice-ocean interaction is briefly discussed.

**Key words** Climate system model, Sea ice, Atmosphere, Ocean, Model evaluation

**摘要** 对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发展的气候系统模式 FGOALS-g1.1 的极地气候模拟现状进行了较为全面的评估。结果表明,FGOALS-g1.1 对南北极海冰的主要分布特征、季节变化和年代际变化趋势具有一定的模拟能力。但也注意到,与观测相比,模式存在以下几方面的问题:(1) 模拟的海冰总面积北极偏多,而南极偏少。北极,北大西洋海冰全年明显偏多;夏季,西伯利亚沿海海冰偏多,而波弗特海海冰偏少。南极,威德尔海和罗斯海冬季海冰偏少。南北极海冰边缘都存在异常的较大范围密集度很小的碎冰区,夏季尤为显著。(2) 海冰流速在南北极海冰边缘和南极大陆沿岸附近较大。北极,模式没能模拟出波弗特涡流,并且由于模式网格中北极点的处理问题,造成其附近错误的海冰流场及厚度分布。这些海冰偏差与模式模拟的大气和海洋状况有着密切的联系。进一步分析表明,FGOALS-g1.1 模拟的冰岛低压和南极绕极西风带明显偏弱,其通过大气环流和海表面风应力影响向极地的热量输送,在很大程度上导

<sup>\*</sup> 资助课题:中国科学院“百人计划”,国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403605),国家科技支撑计划项目(2006BAB18B03),国家自然科学基金面上项目(40676003,40876099),公益性行业科研专项(GYHY200806006)。

作者简介:王秀成,从事极地气候模拟研究。Email:xcwang@mail.iap.ac.cn

致上述的海冰偏差。此外,耦合模式中大气-海冰-海洋的相互作用可以放大子模式中的偏差。

**关键词** 气候系统模式, 海冰, 大气, 海洋, 模式评估

**中图法分类号** P46 P47

## 1 引言

大气环流的形成从根本上说是由极地冷源和赤道热源共同作用的结果。极地冷源和赤道热源一样,对全球气候有着重要的影响。海冰是极地气候系统的重要组成部分,也是全球气候变化最敏感的组分之一。海冰的高反照率大大减少了极地对太阳辐射的吸收,使极地成为全球气候系统的热汇及冷空气的源地;海冰的存在隔绝了海洋与大气的直接联系,大大减弱甚至阻止了大气与海洋之间热量、水汽及动量的交换;海冰的冻结和消融可以改变海洋表层的盐度,从而影响海洋温盐环流的形成和强度。

观测表明,在全球变暖的大背景下,过去30年来北极海冰覆盖范围呈减少的趋势,每10年减少约3%,其中夏季最为显著(Parkinson, et al, 1999; Liu, et al, 2004)。特别是近年来海冰减少的速度明显加快,2007年9月是北极海冰面积自有卫星观测以来的最小纪录(Comiso, et al, 2008)。同时,北极海冰厚度也发生了明显变化。与1958—1976年比较,20世纪90年代中期(1993—1997年),北极海冰的平均厚度变薄了约1.3 m (Rothrock, et al, 2003)。此外,在大气环流强迫下,北极海冰漂移方向及通过弗莱姆海峡向北大西洋输出的海冰通量也发生了明显变化(Maslanik, et al, 1999)。观测分析和数值模拟结果都表明,一方面,海冰的变化可以通过大气环流快速地向全球传播;另一方面,北极海冰输出的多少直接影响到北大西洋北部深层对流的强弱(Aagaard, et al, 1989),进而影响全球海洋温盐环流。因此,在气候系统模式中发展一个完善的海冰模式以至于其能够合理地模拟大气-海冰-海洋相互作用,特别是近年来海冰的快速变化是非常重要的。

气候模式的评估是气候系统模式发展和应用研究中的一个重要环节。本文将对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(LASG)最新的气候系统模式 FGOALS-g1.1(Yu, et al, 2008)在极地气候模拟,特别是海冰模拟的现状进行较为全面的评估,希望通过评估来研究模式物理过程的合理程度,了解误差产生的原因,以明确下一步海冰模式改进的方向。

## 2 模式介绍及资料

自20世纪90年代初,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(LASG)的模式小组就开始着手研制气候系统模式(Zhou, et al, 2005)。最新的耦合模式 FGOALS-g1.1 是以美国国家大气研究中心(NCAR)的通用气候系统模式 CCSM2.0 (Kiehl, et al, 2004)耦合器 CLP5 为基础,包括大气模式 GAMIL1.0 (Wang, et al, 2004),海洋模式 LICOM1.11 (Liu, et al, 2004),海冰模式 CSIM4 (Briegleb, et al, 2004)及陆面模式 CLM2 (Bonan, 1998)4个分量模式(图1)(Yu, et al, 2008)。大气模式和陆面模式的分辨率约为 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ ,海洋模式和海冰模式为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。海冰模式 CSIM4 的动力学模块采用弹-粘-塑(EVP)海冰流变学(Hunke, et al, 1997)。热力学模块采用了拉格朗日型的海冰厚度分布函数(Bitz, et al, 2001)。根据海冰厚度将海冰分为5类,不同种类海冰之间的再分布采用 Lipscomb 等的线性再分布方案(Lipscomb, 2001)。模式考虑了海冰内部的卤水泡效应,并对其进行了参数化及保持模式能量守恒(Bitz, et al, 1999)。海冰模式和海洋模式均将北极点处理为一个孤岛,也就是说没有北极点。根据 IPCC 设定的20世纪CO<sub>2</sub>排放情景,俞永强等将 FGOALS-g1.1 从1851年1月开始积分,对20世纪全球气候进行了模拟(Yu, et al, 2008)。模式初始场为 FGOALS-g1.1 工业革命前控制试验第50年年末的瞬时场。这里我们选取该试验1979—1999年海冰、大气及海洋逐月月平均模拟场与观测资料进行对比分析。

本文所使用的观测资料包括:(1)美国国家冰雪数据中心(NSIDC, National Snow and Ice Data Center)的南北极海冰密集度(Comiso, 1999, updated 2007)和海冰流速场资料(Fowler, 2003, updated 2007),它们都是利用 SSMR(Scanning Multichannel Microwave Radiometer)和 SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)卫星资料反演获得的;(2)美国潜艇观测的北极海冰厚度场资料(Bourke, et al, 1987);(3)美国国家环境预报中心(NCEP, National Centers for Environmental Prediction)再分析资料

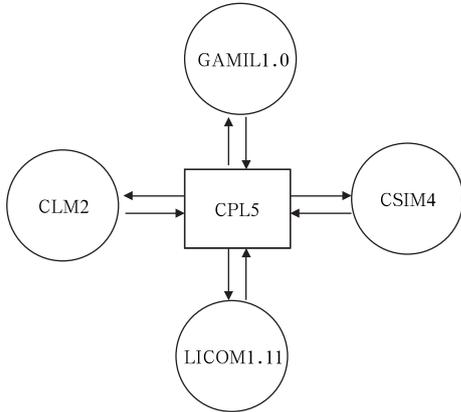


图1 FGOALS\_g1.1 气候系统模式结构示意  
Fig.1 Structure of FGOALS\_g1.1 climate system model

(Kanamitsu, et al, 2002),包括:海平面气压场、近地面大气温场,其中北半球近地面大气温场采用北极国际浮标站计划(International Arctic Buoy Program)资料(Rigor, et al, 2000);(4) 英国 Hadley 气候中心的海表面温度再分析资料(HadISST)(Rayner, et al, 2003)。

### 3 模式评估

#### 3.1 海冰

图2为卫星观测和模式模拟的1979—1999年北极2月和9月平均的海冰密集度场(2月和9月分别是北极海冰覆盖面积最大和最小的月份)。从观测可以看到,2月,海冰密集度在北冰洋最大,并向北大西洋和太平洋方向减小。在巴伦支海、格陵

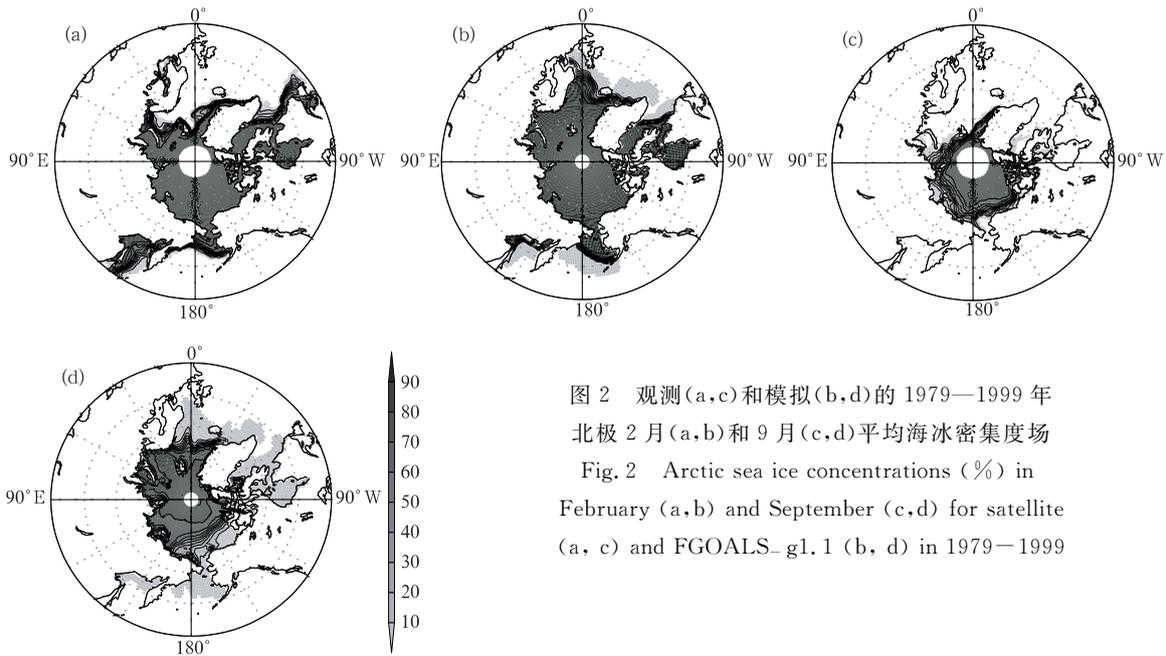


图2 观测(a,c)和模拟(b,d)的1979—1999年北极2月(a,b)和9月(c,d)平均海冰密集度场  
Fig.2 Arctic sea ice concentrations (%) in February (a,b) and September (c,d) for satellite (a, c) and FGOALS\_g1.1 (b, d) in 1979-1999

兰海、丹麦海峡、戴维斯海峡、白令海及鄂霍次克海海冰密集度梯度较大。模式模拟出了2月海冰密集度从北冰洋向赤道方向减小的形势,但在巴伦支海、格陵兰海、挪威海与观测存在明显偏差。模式中这些区域均为海冰所覆盖,而观测显示这些区域基本上没有海冰。白令海模拟的海冰也偏多。因此,模式模拟的海冰边缘线与观测相比显著偏南,但在拉布拉多海和鄂霍次克海模拟的海冰边缘线向南延伸不够。

9月,根据观测,海冰收缩至北冰洋内,海冰密集度大值区偏向于波弗特海一侧,欧亚大陆沿海和

阿拉斯加北侧附近海冰密集度小于40%,其中西伯利亚沿岸海冰密集度甚至小于10%。与2月相似,模式在巴伦支海、格陵兰海、挪威海模拟的海冰明显偏多,而且海冰密集度大值中心偏向于北大西洋一侧,这与观测不符。在西伯利亚沿海,模拟的海冰密集度达到80%,是观测的3倍以上。而在波弗特海南部,模拟的海冰密集度比观测值小。此外,我们注意到,无论2月还是9月,模式中海冰边缘都存在较大范围密集度很小的碎冰区。

图3给出北极海冰流速场。2月,观测的北极海冰运动主要特征是波弗特涡流和穿极漂流。波弗

特涡流是位于波弗特海的反气旋性海冰环流,其南支流向楚科奇海,北支汇入穿极漂流。穿极漂流主要源自拉普捷夫海,穿越北极点,经弗莱姆海峡,沿格陵兰岛东岸进入北大西洋。另外,从喀拉海经弗莱姆海峡和巴伦支海向北大西洋也各有一支较强的海冰流。巴芬湾、白令海以及鄂霍次克海也均有向南的海冰输送。在模式中,由于网格的处理问题,海

冰无法穿过北极点,而是围绕北极点构成一个顺时针海冰环流。尽管如此,模式仍模拟出了一支由北冰洋经弗莱姆海峡流向北大西洋的海冰流。与观测的穿极漂流比较,这支海冰流的源地偏西。模式没有能够模拟出波弗特涡流。此外,模式中海冰边缘区海冰流速异常偏大,这会导致较强的海冰平流作用,将海冰向南输送,从而在海冰边缘形成碎冰区。

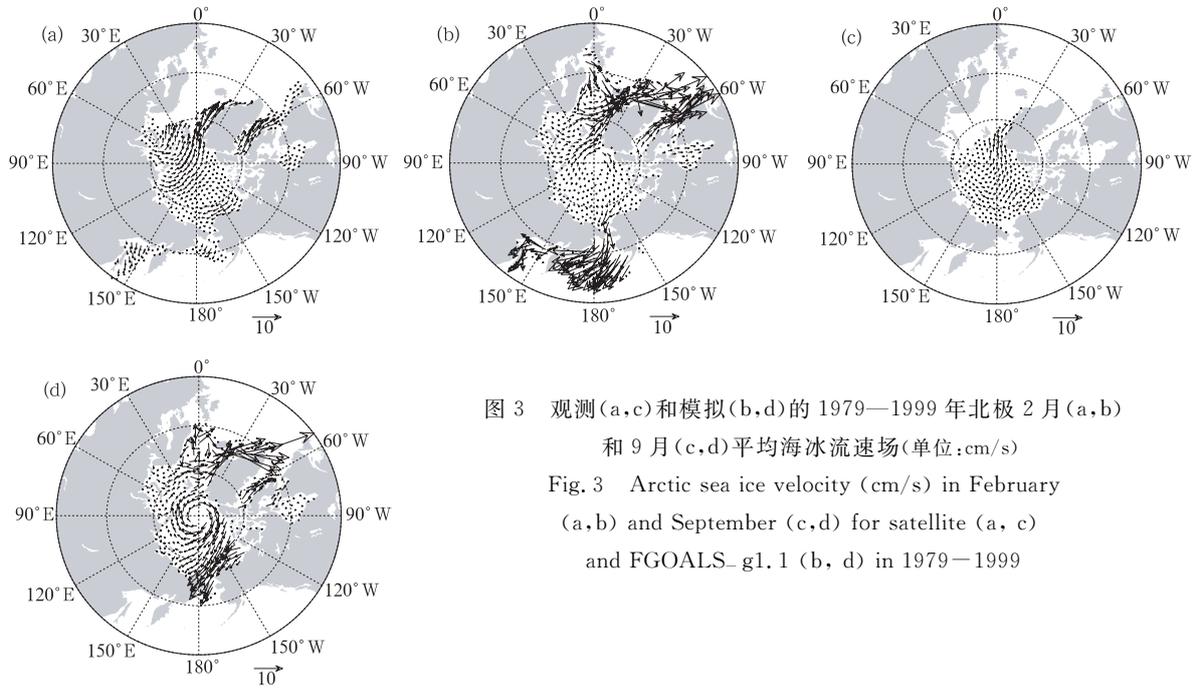


图3 观测(a,c)和模拟(b,d)的1979—1999年北极2月(a,b)和9月(c,d)平均海冰流速场(单位:cm/s)  
Fig. 3 Arctic sea ice velocity (cm/s) in February (a, b) and September (c, d) for satellite (a, c) and FGOALS\_g1.1 (b, d) in 1979—1999

9月,观测的海冰运动主要特征和2月基本一致,但流速有所减弱。同样,模式对穿极漂流和海冰边缘区流场的模拟与观测仍有较大偏差。与2月不同,模式中波弗特海的海冰流速异常偏大,这会导致过多的海冰从波弗特海向白令海输送,使得波弗特海海冰密集度偏小和海冰厚度偏薄,而白令海海冰偏多。

由于观测资料的限制,无法获得北极月平均的海冰厚度场。这里我们采用美国潜艇观测的北极年平均的海冰厚度资料来评估模式的模拟结果。观测和模式模拟的北极年平均海冰厚度场(图4)表明,海冰在格陵兰岛北侧和加拿大海盆最厚(图4a),可达5 m;海冰厚度向欧亚大陆逐渐变薄,在西伯利亚

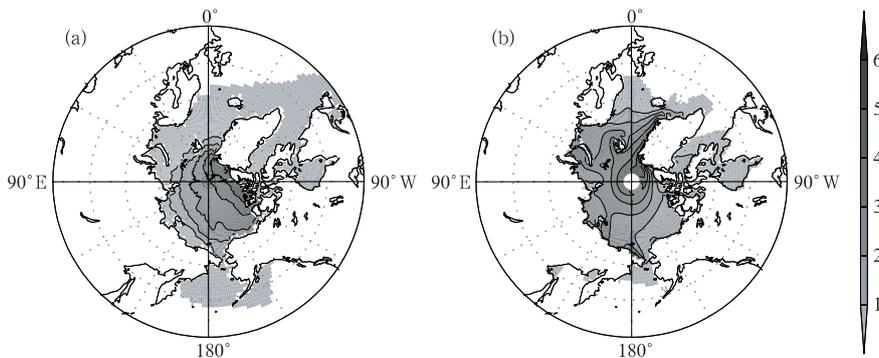


图4 北极年平均海冰厚度场(a. 观测, b. 模拟; 单位: m)  
Fig. 4 Arctic annual mean ice thickness (m) from submarine (a) and FGOALS\_g1.1 (b) in 1979—1999

沿岸和巴伦支海最薄,小于 1 m。由图 4b 可以看到,模式模拟的海冰厚度分布与观测显著不同,海冰在北极点附近地区最厚,且以北极点为中心向欧亚和北美大陆逐渐变薄。这种错误的海冰厚度分布与模式网格中北极点的处理方式有关。FGOALS\_g1.1 的海冰模式把北极点当作一个孤岛,因此海冰无法穿越北极点向弗莱姆海峡输送,而且由于海冰与这个孤岛之间的摩擦作用,造成海冰在北极点周围堆积,使得这里的海冰最厚。

海冰表面积雪对海冰密集度和厚度分布有着重要的影响。一方面积雪反照率比海冰大得多。如果积雪偏多,将会增强海冰—反照率正反馈机制,加剧

局地冷却效应,使得海冰偏多。另一方面如果积雪偏厚,短波辐射难以穿透雪盖和冰层加热海水,从而造成海冰底部融化减弱,海冰偏厚。图 5 是模式模拟的北极 2 和 9 月平均的海冰表面积雪厚度场。模拟结果表明,积雪最厚的区域出现在格陵兰海到北极点一带,这与观测(Warren, et al, 1999)明显不符。文献(Warren, et al, 1998)的图 9 表明 2 和 9 月格陵兰岛北侧和加拿大海盆积雪最厚,并向西伯利亚沿岸递减,这与观测的海冰厚度分布特征基本是一致的。

图 6 为南极 9 月和 2 月的海冰密集度场(9 月和 2 月分别是南极海冰覆盖面积最大和最小的月

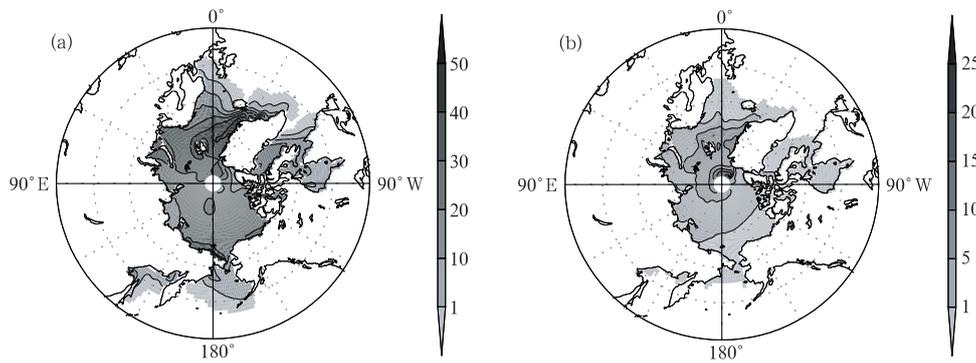


图 5 FGOALS\_g1.1 模拟的 1979—1999 年北极 2 月(a)和 9 月(b)平均海冰表面积雪厚度场(单位:cm)

Fig. 5 Arctic snow depth (cm) over sea ice in February (a) and September (b) from FGOALS\_g1.1 in 1979—1999

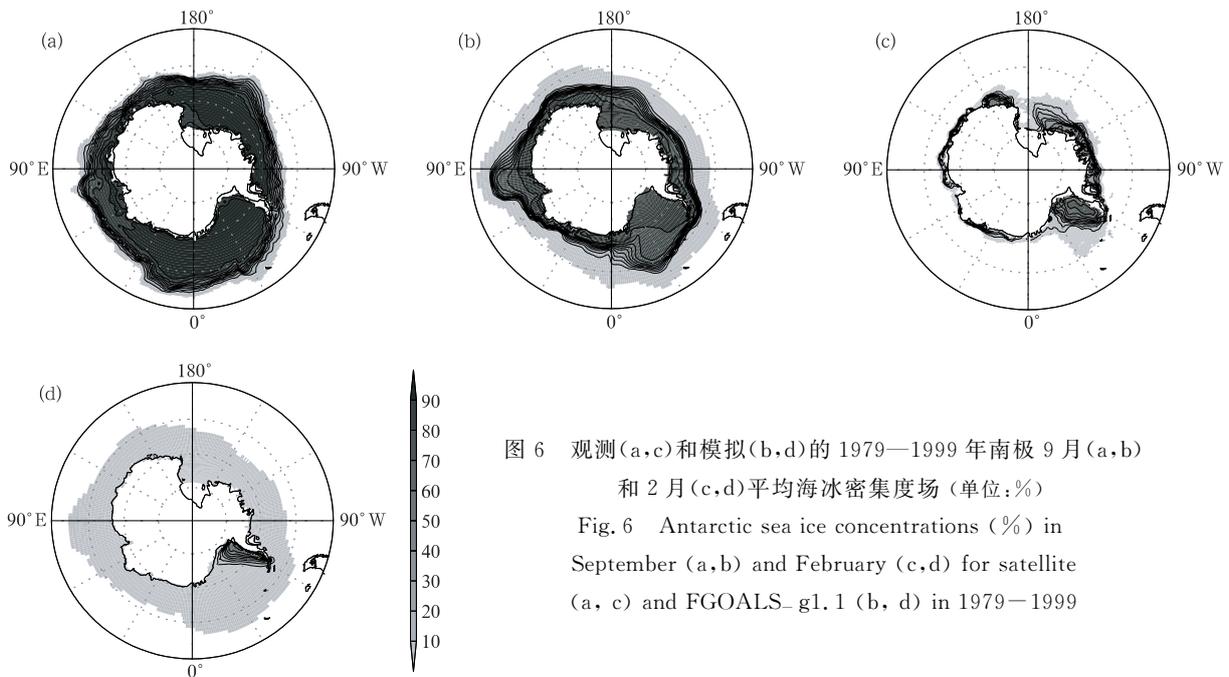


图 6 观测(a,c)和模拟(b,d)的 1979—1999 年南极 9 月(a,b)和 2 月(c,d)平均海冰密集度场(单位:%)

Fig. 6 Antarctic sea ice concentrations (%) in September (a,b) and February (c,d) for satellite (a, c) and FGOALS\_g1.1 (b, d) in 1979—1999

份)。9月,从卫星观测可以看到,海冰密集度从南极大陆沿岸向赤道方向减小。海冰密集度最大的区域在威德尔海和罗斯海。模式模拟出了海冰密集度从南极大陆沿岸向赤道方向减小的分布特征,但威德尔海和罗斯海的海冰密集度大于90%的面积比观测明显偏小,特别是在东南太平洋、大西洋和印度洋之间向赤道方向扩展不够。2月,根据观测,海冰基本上收缩到南极大陆沿岸附近,但西南威德尔海和东南罗斯海的海冰密集度仍然较大。模式模拟的威德尔海海冰密集度与观测相似,但罗斯海海冰密集度太小。特别值得注意的是南大洋存在大范围的密集度很小的碎冰区。事实上,无论是南极还是北极,FGOALS-g1.1模拟的海冰边缘都存在较大范

围的碎冰区,夏季(南极2月和北极9月)尤其明显。

图7给出南极9月和2月的海冰流速场。9月,根据卫星观测,威德尔海和罗斯海的海冰呈气旋性流动。在南大洋,海冰基本上是自西向东运动,而在靠近南极大陆的海域,海冰基本上自东向西运动。模式模拟出了威德尔海的海冰气旋性运动,但罗斯海的海冰流向却与观测完全相反。此外,模式中海岸附近海冰流速异常偏大,这可能与模式中海岸冰与大陆之间的摩擦不够有关。2月,南极海冰流速大大减弱,仅在威德尔海有一支较强的向北的海冰流。模式模拟出了威德尔海的这支海冰流。和9月的情况类似,模式在海岸附近,如威德尔海和罗斯海沿岸,海冰流速异常偏大。

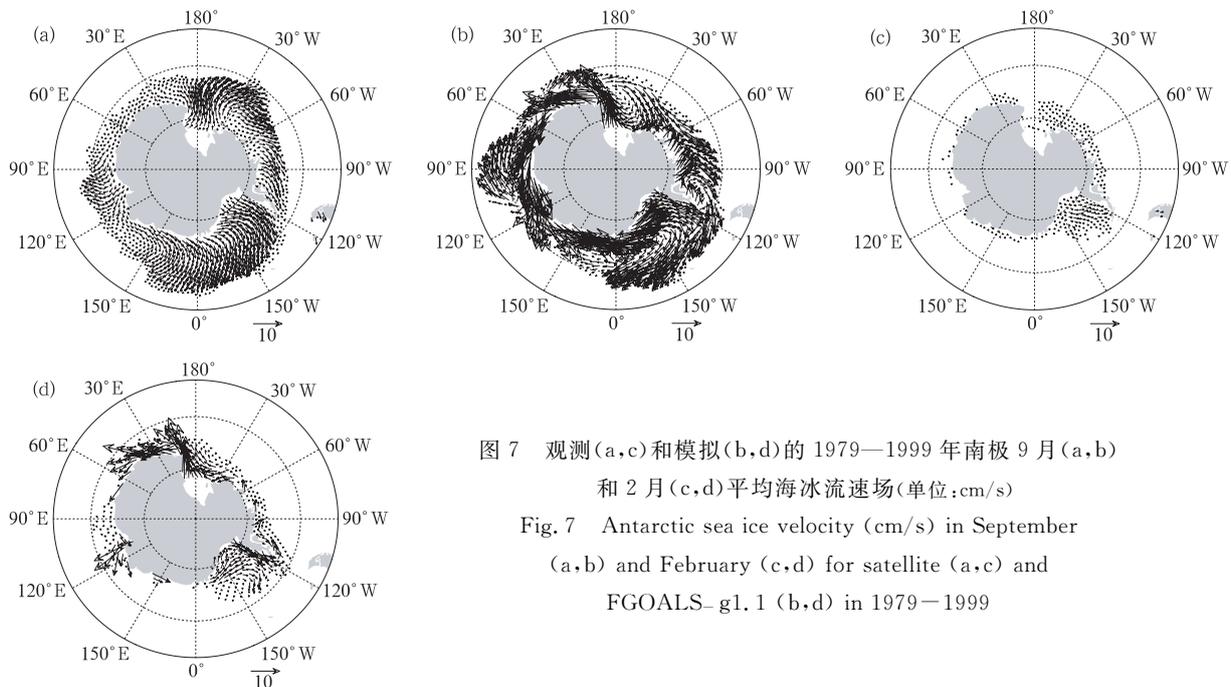


图7 观测(a,c)和模拟(b,d)的1979—1999年南极9月(a,b)和2月(c,d)平均海冰流速场(单位:cm/s)  
Fig. 7 Antarctic sea ice velocity (cm/s) in September (a,b) and February (c,d) for satellite (a,c) and FGOALS-g1.1 (b,d) in 1979—1999

由于南极海冰厚度缺乏观测,所以无法检验南极海冰厚度的模拟结果。模式结果表明,年平均南极海冰厚度一般为0.2—0.6 m,南极半岛东岸海冰最厚,可达2.2 m。模式模拟的海冰厚度分布特征与现有的经验观测基本上是一致的。

此外,我们还根据观测和模式模拟的海冰密集度资料计算了1979—2000年南北极2和9月海冰面积的标准差和变化趋势(表1)。结果表明,模式模拟的多年平均的海冰面积北极偏多,南极偏少,但

模拟的海冰面积的年际变率幅度(标准差)还是比较接近观测的。在北极,模式基本模拟出了这一期间北极海冰覆盖面积减少的趋势,但比观测小,特别是在夏季。在南极,模式中9月海冰面积呈减少的趋势,这与观测的增加趋势正好相反。

通过上述比较,我们可以看到,FGOALS-g1.1的海冰模拟结果与观测存在一定的偏差。除了海冰模式自身的不完善外,由于大气、海洋与海冰间的相互作用,模式中大气和海洋模拟状况的好坏必然会

表1 观测和模拟的1979—2000年2月和9月南北极海冰面积、标准差和年变率  
Table 1 Total sea ice area, standard deviation, and trend in February and September in the Arctic (left) and Antarctic (right) for satellite and FGOALS\_g1.1 in 1979—2000

	北极 2月			北极 9月			南极 2月			南极 9月		
	海冰面积	标准差	变化趋势									
	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> /a	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> /a	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> /a	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> /a
观测	14.7	0.29	-0.026*	6.4	0.54	-0.049*	2.2	0.20	-0.009	16.3	0.35	0.031*
模拟	15.5	0.18	-0.019*	8.2	0.40	-0.025	0.5	0.15	-0.009	10.8	0.39	-0.045*

注: \* 表中带\*表示该值通过信度为95%的t检验。

1987年6月及以前卫星无法观测到84.5°N以北的区域,1987年7月及以后卫星无法观测到87°N以北的区域,在计算观测海冰面积时,认为相应时段这些区域海冰密集度为100%;模式中由于网格的原因,88°N以北为一孤岛,计算海冰面积时,认为该区域海冰密集度为100%。

影响到海冰的模拟效果。下面我们进一步分析一下 FGOALS\_g1.1 中大气和海洋的模拟结果及其对海冰模拟的影响及途径。

### 3.2 大气和海洋

图8是浮标观测和模拟的北极近地面大气温度场。2月,根据观测,近地面温度从北太平洋和北大西洋向北冰洋迅速变冷,最冷的地区出现在加拿大海盆和西伯利亚北部(中心温度分别为-40℃和-42℃),而北极点附近并非最冷。模式再现了温度从北大西洋和北太平洋向北冰洋递减的形势,但最冷的地区出现在北极点附近,这与观测不符。在巴伦支海和北大西洋,模式模拟的暖舌北伸不够,造成这些区域气温明显偏冷,进而导致海冰明显偏多;而模式在鄂霍次克海模拟的气温偏暖,导致海冰偏

少。9月,0℃等温线基本上收缩到北冰洋内,冷中心位于格陵兰岛北部(中心温度为-10℃)。和2月相似,9月模式在北极点、北太平洋以及北大西洋与观测仍存在较大偏差。

图9给出北极2和9月的海表温度场。与上述的近地面大气温度场类似,观测的海温从中高纬度向极区递减,北大西洋的暖水可以深入到巴伦支海附近。而模式模拟的海温在北大西洋和巴伦支海明显偏冷,也就是说北大西洋的暖水无法进入到巴伦支海附近。此外,9月模式海温在西伯利亚沿岸也明显偏冷。

上述模式模拟的北极气温和海温偏差与大气环流的模拟有着很大关系。根据NCEP再分析资料可以看到(图10),2月,北极的主要大气活动中心有

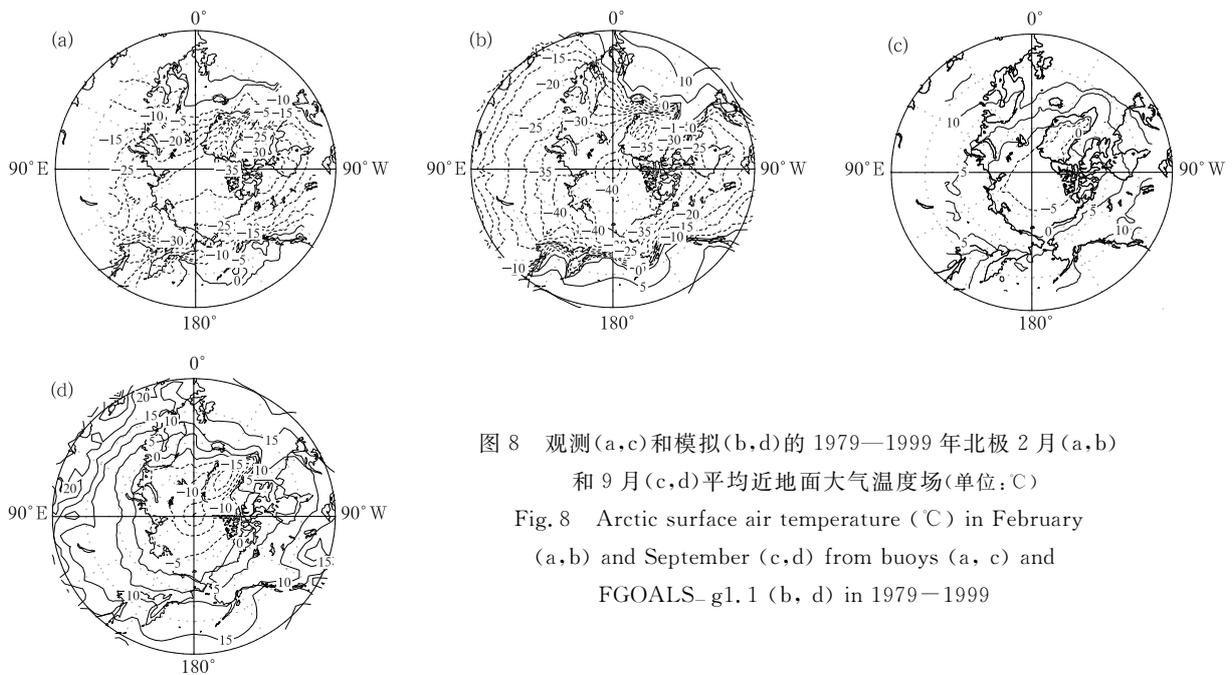


图8 观测(a,c)和模拟(b,d)的1979—1999年北极2月(a,b)和9月(c,d)平均近地面大气温度场(单位:℃)  
Fig. 8 Arctic surface air temperature (°C) in February (a,b) and September (c,d) from buoys (a,c) and FGOALS\_g1.1 (b,d) in 1979—1999

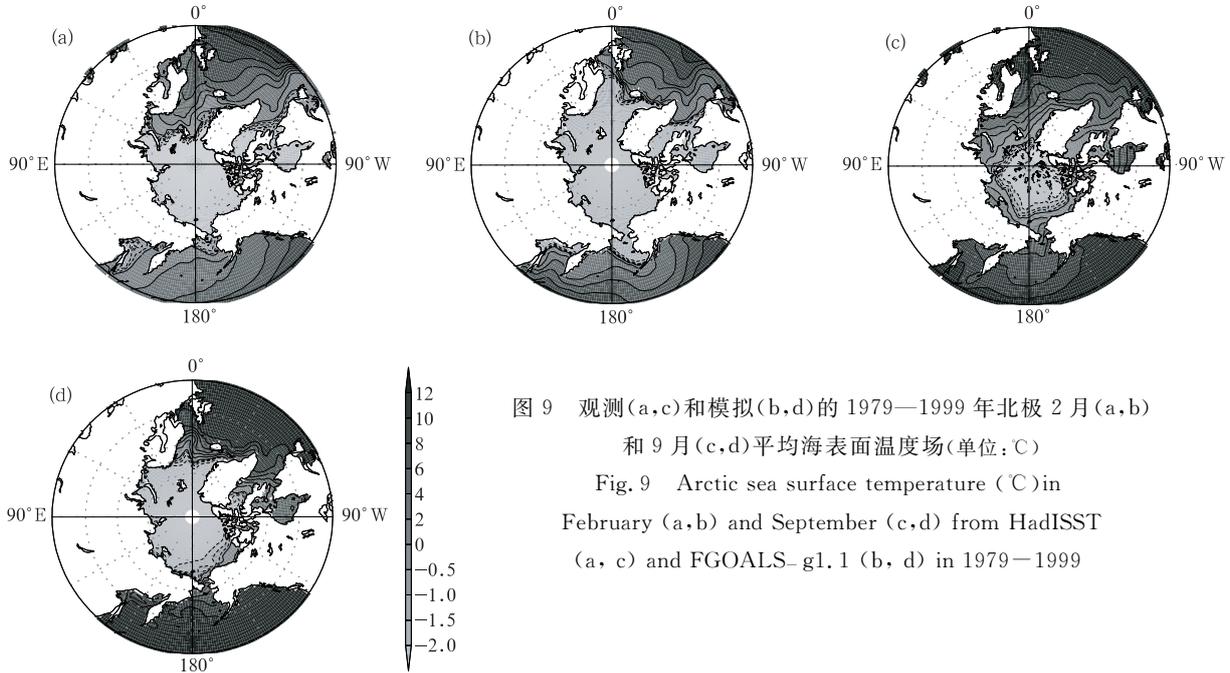


图9 观测(a,c)和模拟(b,d)的1979—1999年北极2月(a,b)和9月(c,d)平均海表面温度场(单位:°C)  
 Fig. 9 Arctic sea surface temperature (°C) in February (a,b) and September (c,d) from HadISST (a, c) and FGOALS\_g1.1 (b, d) in 1979—1999

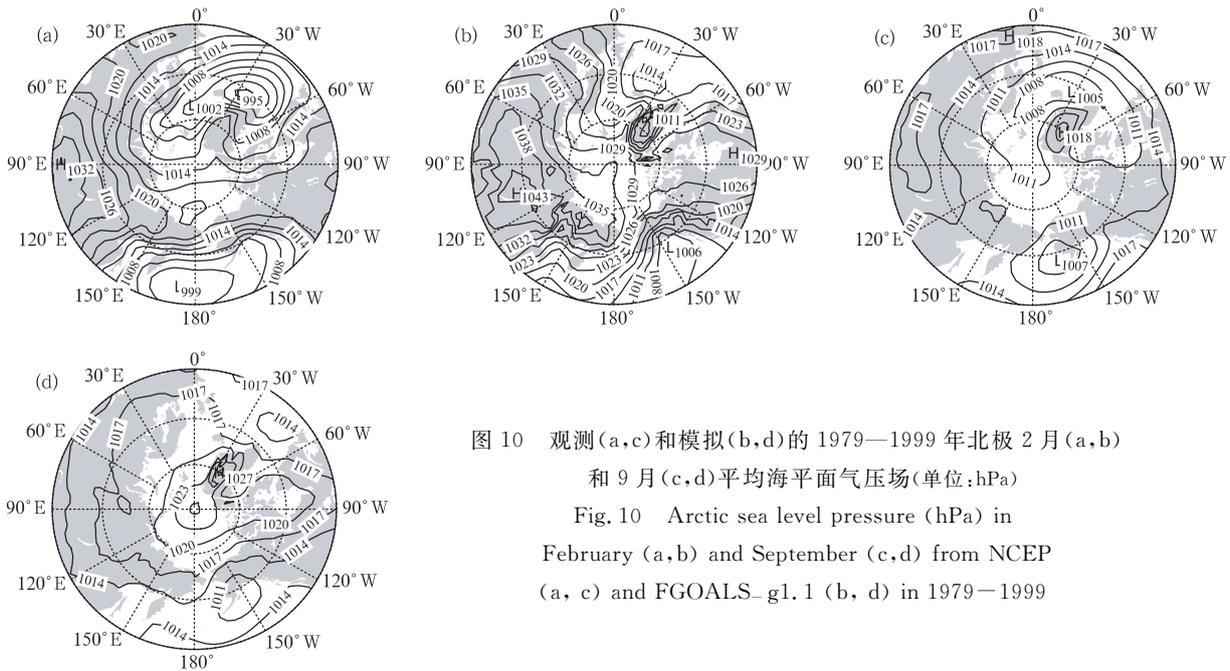


图10 观测(a,c)和模拟(b,d)的1979—1999年北极2月(a,b)和9月(c,d)平均海平面气压场(单位:hPa)  
 Fig. 10 Arctic sea level pressure (hPa) in February (a,b) and September (c,d) from NCEP (a, c) and FGOALS\_g1.1 (b, d) in 1979—1999

冰岛低压,阿留申低压以及西伯利亚高压。在模式中,西伯利亚高压中心气压明显偏强,且范围明显偏大,1030 hPa 等值线跨越北冰洋延伸至北美;冰岛低压明显偏弱。冰岛低压偏弱使得巴伦支海和挪威海的西南气流减弱。西南气流的减弱一方面导致通过大气环流向巴伦支海和挪威海输送的热量减少,另一方面导致海表风应力减弱,这使得深入北极的

北大西洋暖流减弱,通过海洋向北输送的热量也减少。这必然会造成巴伦支海大气和海洋偏冷,海冰偏多。同时,模式中阿留申低压也偏弱,而且中心偏向阿拉斯加,但北太平洋模式海冰的偏差并不如北大西洋明显,这与阿留申低压北部气流近于纬向分布有关。和2月类似,模式模拟的9月冰岛低压和阿留申低压也偏弱;而整个北冰洋,特别是北极点附

近气压异常偏高。

由 NCEP 近地面大气温度场可以看到(图 11), 在南极无论 9 月还是 2 月, 南极大陆都为冷中心, 温度自南大洋向极地方向逐渐变冷。模式较好地模拟出了这种分布特征。但在南大洋, 模式模拟的气温偏暖, 2 月(夏季)尤其明显。

根据 Hadley 中心的再分析资料(图 12), 被海冰覆盖的南极大陆沿岸海域海温最低, 海温从南大洋向南极大陆方向逐渐变冷; 威德尔海和罗斯海是南大洋两个主要的冷中心。模式基本模拟出了上述海温的分布特征, 但模拟的海温总体偏高, 2 月(夏季)尤其明显。

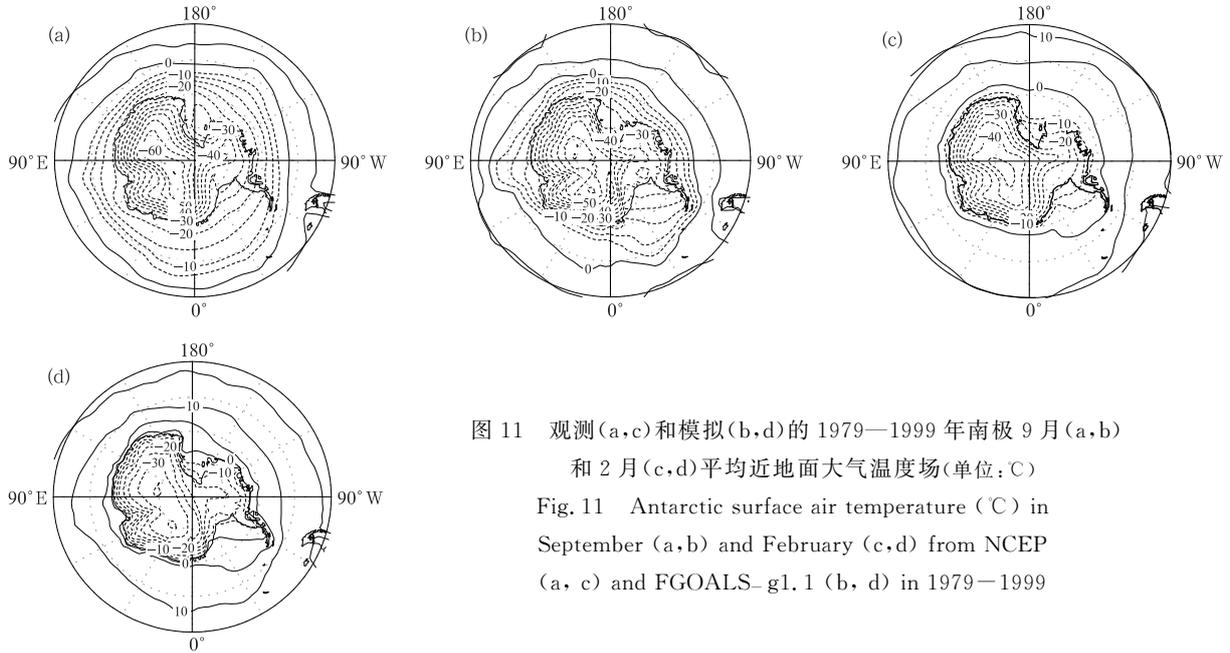


图 11 观测(a,c)和模拟(b,d)的 1979—1999 年南极 9 月(a,b) 和 2 月(c,d)平均近地面大气温度场(单位: C)  
 Fig. 11 Antarctic surface air temperature (°C) in September (a,b) and February (c,d) from NCEP (a, c) and FGOALS-g1.1 (b, d) in 1979—1999

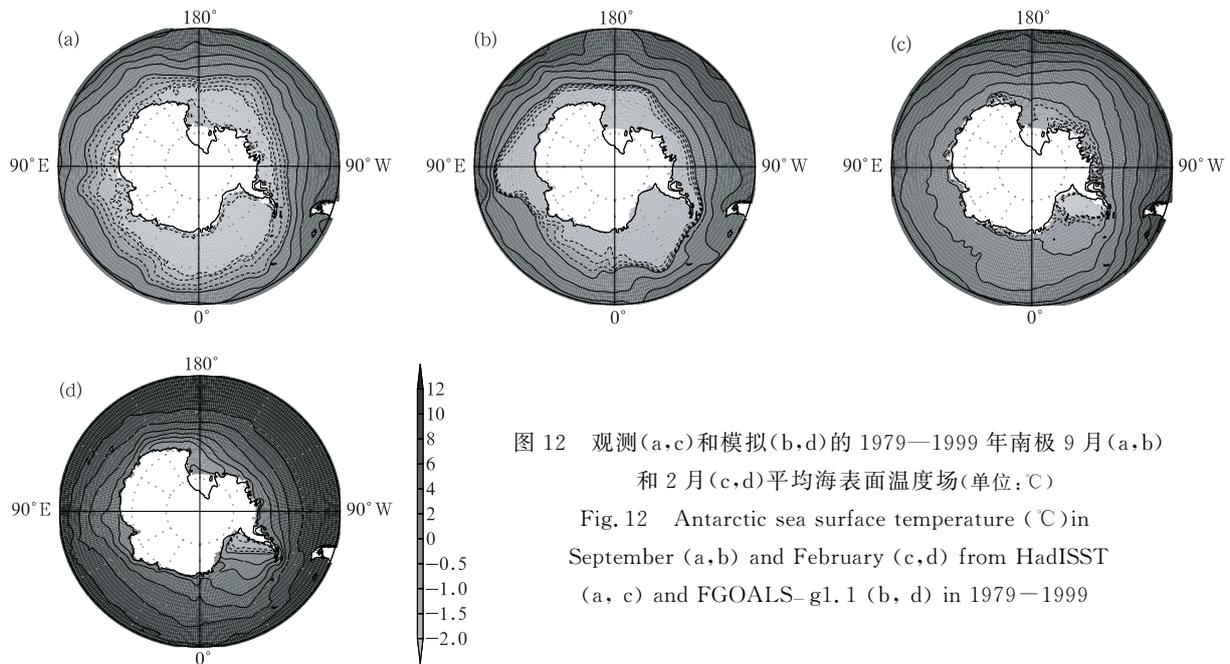


图 12 观测(a,c)和模拟(b,d)的 1979—1999 年南极 9 月(a,b) 和 2 月(c,d)平均海表面温度场(单位: C)  
 Fig. 12 Antarctic sea surface temperature (°C) in September (a,b) and February (c,d) from HadISST (a, c) and FGOALS-g1.1 (b, d) in 1979—1999

同样,模式模拟的南极近地面大气温度偏差与海平面气压场有关。据 NCEP 再分析资料(图 13),在南大洋终年存在一个强大的环绕南极大陆的低压系统,低压中心北侧  $70^{\circ}$ — $45^{\circ}$ S 等压线密集,表明气压梯度力较大,西风带即位于该地区。沿纬圈闭合的强劲

西风带限制了极区与外界的热量交换。模式模拟的绕极低压中心比观测要弱, $70^{\circ}$ — $45^{\circ}$ S 等压线稀疏(夏季尤其明显),这造成西风带偏弱,有利于大气中热量向高纬度输送,从而导致极区大气温度偏高。大气温度偏高必然导致模拟的南极海冰面积偏少。

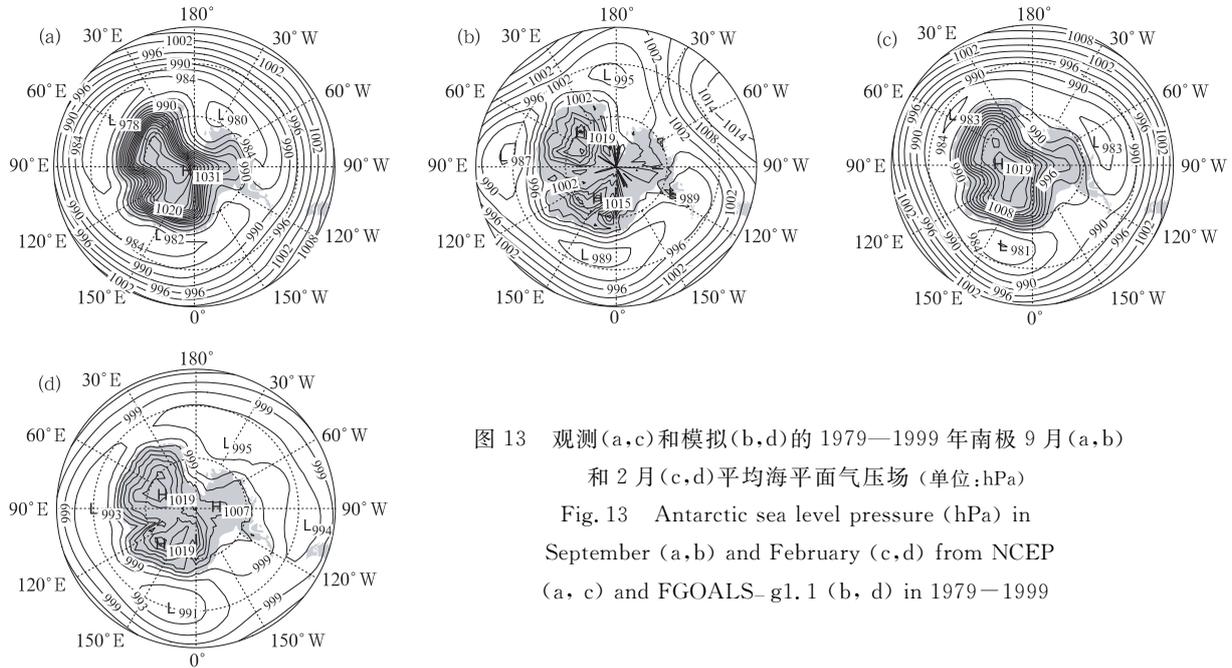


图 13 观测(a,c)和模拟(b,d)的 1979—1999 年南极 9 月(a,b)和 2 月(c,d)平均海平面气压场(单位:hPa)

Fig. 13 Antarctic sea level pressure (hPa) in September (a,b) and February (c,d) from NCEP (a, c) and FGOALS-g1.1 (b, d) in 1979—1999

## 4 结论

本文对 LASG 最新版本的气候系统模式 FGOALS-g1.1 的极地气候模拟能力进行了较为全面的评估。结果表明,FGOALS-g1.1 对极地气候有一定的模拟能力,但也存在明显的偏差。

(1) 模式对南北极海冰密集度的主要空间分布特征和季节变化具有一定的模拟能力,但模拟的海冰总面积北极偏多,南极偏少。具体来说,北极,北大西洋海冰全年均偏多,西伯利亚沿海夏季海冰偏多,而波弗特海夏季海冰偏少。南极,威德尔海和罗斯海冬季海冰偏少。南北极海冰边缘都存在较大范围密集度很小的碎冰区,特别是在南北极夏季。

(2) 模式基本模拟出了南北极海冰运动的主要特征,包括穿极漂流和威德尔海的海冰流场。但存在一些系统性偏差:海冰流速偏大,特别是在南北极海冰边缘区和南极大陆沿岸。海冰边缘区流速偏大可导致强的平流作用,在一定程度上有利于海冰边

缘区形成大范围的碎冰。南极大陆沿岸海冰流速偏大可能与海冰和海岸之间的摩擦偏小有关。此外,在北极,模式没有能够模拟波弗特涡流,同时由于网格原因,模式模拟的北极点附近的流场不真实。

(3) 模式模拟的南北极年平均海冰厚度在量级上和观测基本是一致的,但模拟的海冰在北极点附近地区最厚,且以北极点为中心向欧亚和北美大陆逐渐变薄,这与观测的海冰在格陵兰岛北侧和加拿大海盆最厚,并向西伯利亚沿岸递减不一致。

(4) 模式模拟出了 20 世纪 70 年代末以来北极海冰面积减少的趋势。但模拟结果同时表明,南极 9 月(冬季)海冰面积呈减少趋势,这与观测正好相反。

上述海冰偏差与模式模拟的大气和海洋状况的好坏有着密切的联系。而且,耦合模式中大气-海冰-海洋的相互作用可以在一定程度上放大子模式中的偏差。图 14 是利用大气模式比较计划 (AMIP) 提供的 AMIP II 海表面温度和海冰密集度

为下边界条件驱动大气模式 GAMIL1.0 得到的 1979—1999 年南北极 2 和 9 月平均海平面气压场。与图 10 和 13 进行对比可以看到,与耦合模式的结果相比,单独大气模式模拟的冰岛低压、阿留申低压和西伯利亚高压以及南极绕极流中气压梯度更接近观测,但仍比观测偏弱。冰岛低压偏弱使得大气和海洋

向北大西洋输送的热量少,导致该区域大气和海洋温度偏冷,海冰偏多。南极绕极流中气压梯度偏小,即西风带偏弱,有利于大气中热量向高纬度输送,导致近地面大气温度偏暖,海冰偏少。而海冰偏多或偏少会进一步通过海冰-反照率正反馈机制增强大气局地冷源或热源效应,从而加剧了已有的大气环流偏差。

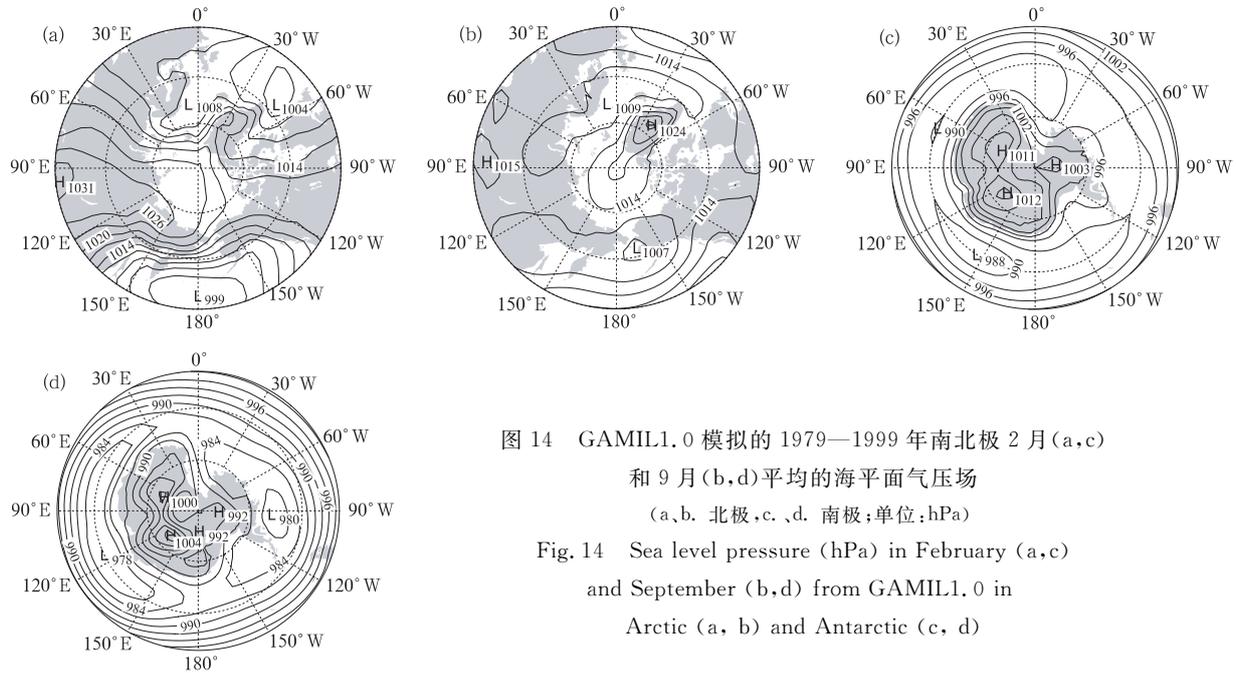


图 14 GAMIL1.0 模拟的 1979—1999 年南北极 2 月 (a,c) 和 9 月 (b,d) 平均的海平面气压场 (a,b, 北极,c,d, 南极;单位:hPa)

Fig. 14 Sea level pressure (hPa) in February (a,c) and September (b,d) from GAMIL1.0 in Arctic (a, b) and Antarctic (c, d)

References

Aagaard K, Carmack E C. 1989. The role of sea ice and other fresh-water in the Arctic circulation. *J Geophys Res Oceans*, 94 (C10): 14485-14498

Bitz C M, Lipscomb W H. 1999. An energy-conserving thermodynamic model of sea ice. *J Geophys Res Oceans*, 104 (C7): 15669-15677

Bitz C M, Holland M M, Weaver A J, et al. 2001. Simulating the ice-thickness distribution in a coupled climate model. *J Geophys Res Oceans*, 106(C2): 2441-2463

Bonan G B. 1998. The land surface climatology of the NCAR Land Surface Model coupled to the NCAR Community Climate Model. *J Clim*, 11(6): 1307-1326

Bourke R H, Garrett R P. 1987. Sea ice thickness distribution in the Arctic-Ocean. *Cold Regions Sci Techn*, 13(3): 259-280

Briegleb B P, Hunke E C, Bitz C M, et al. 2004. The sea ice simulation of the Community Climate System Model, version two. NCAR Tech. Note NCAR/TN-451STR. 34pp

Comiso J C. 1999, updated 2007. Bootstrap sea ice concentrations

from NIMBUS-7 SMMR and DMSP SSM/I. National Snow and Ice Data Center, Boulder, Colorado USA. Digital media

Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. 2008. Accelerated decline in the Arctic Sea ice cover. *Geophys Res Lett*, 35: L01703

Fowler C. 2003, updated 2007. Polar Pathfinder Daily 25 km EASE-Grid Sea Ice Motion Vectors. National Snow and Ice Data Center, Boulder, Colorado USA. Digital media

Hunke E C, Dukowicz J K. 1997. An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics. *J Phys Oceanography*, 27(9): 1849-1867

Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woolen J, et al. 2002. NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull Amer Meteor Soc*, 83: 1631-1643

Kiehl J T, Gent P R. 2004. The Community Climate System Model, version 2. *J Clim*, 17(19): 3666-3682

Lipscomb W H. 2001. Remapping the thickness distribution in sea ice models. *J Geophys Res Oceans*, 106(C7): 13989-14000

Liu H L, Zhang X H, Li W, et al. 2004. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluation. *Adv Atmos Sci*, 21(5):675-690

- Liu J P, Curry J A, Hu Y Y. 2004. Recent Arctic sea ice variability: connections to the Arctic oscillation and the ENSO. *Geophys Res Lett*, 31(9): L09211
- Maslanik J A, Lynch A, Fowler C. 1999. Assessing 2-D and coupled-model simulations of sea ice anomalies using remotely-sensed polar pathfinder products//*Proc Fifth Conf on Polar Meteorology and Oceanography*. Dallas, TX. Amer Meteor Soc, 476-479
- Parkinson C L, Cavalieri D J, Gloersen P, et al. 1999. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978–1996. *J Geophys Res Oceans*, 104(C9): 20837-20856
- 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): doi:10.1029/2002JD002670
- Rigor I G, Colony R L, Martin S. 2000. Variations on surface air temperature in the Arctic from 1979–1997. *J Clim*, 13: 896-914
- Rothrock D A, Zhang J, Yu Y. 2003. The arctic ice thickness anomaly of the 1990s: A consistent view from observations and models. *J Geophys Res Oceans*, 108 (C3): doi: 10.1029/2001jc001208
- Wang B, Wan H, Ji Z Z, et al. 2004. Design of a new dynamical core for global atmospheric models based on some efficient numerical methods. *Sci China, Ser. A*, 47(S1): 4-21
- Warren S G, Rigor I G, Untersteiner N, et al. 1999. Snow depth on Arctic sea ice. *J Clim*, 12(6): 1814-1829
- Yu Y Q, Zhi H, Wang B, et al. 2008. Coupled model simulations of climate changes in the 20th century and beyond. *Adv Atmos Sci*, 25(4): 641-654
- Zhou T J, Wang Z Z, Yu R C, et al. 2005. The climate system model FGOALS-s using LASG/IAP spectral AGCM SAMIL as its atmospheric component. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 63(5): 702-715

#### 附中文参考文献

- 周天军,王在志,宇如聪等. 2005. 基于 LASG/IAP 大气环流谱模式的气候系统模式. *气象学报*, 63(5):702-715