

研究进展

北极海冰短期预报和中长期预估模式研究进展

查宇凡¹ 张瑜^{1,2} 陈长胜³ 徐丹亚²

(¹上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

²南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;

³马萨诸塞大学达特茅斯分校海洋科学与技术学院, 马萨诸塞州 新贝德福德市 02744, 美国)

摘要 在全球气候变暖的背景下, 北极海冰的快速变化对北冰洋的自然环境、水文状况、生态系统等均产生显著的影响。作为全球气候变化的重要指示器, 加强对北极海冰未来变化的精确预估将增进对北极乃至全球气候变化趋势的理解和认识。当前, 数值模式是有效预估海冰未来变化的主要手段之一, 然而由于影响模式准确度的因素众多, 模式之间的结果差异较大。因此, 本文梳理了目前国内外有关北冰洋短期预报以及中长期预估模式的研究进展, 着重对各类模式在北极海冰的密集度、覆盖范围和面积、厚度以及漂移速度等关键要素的模拟精度进行研究, 分析了当前模式对北极海冰未来变化趋势的预估, 并展望了数值模式在北极海冰预估方面的研究与应用前景。

关键词 北极 海冰 预报 预估 模式

doi: 10.13679/j.jdyj.20220416

0 引言

在全球气候变暖的背景下, 过去几十年北极正在发生快速变化, 如海冰快速减退、北极放大效应^[1-2], 成为全球气候变化的关键区域(图 1)。北极海冰是全球气候系统变化较快、较明显的组成部分之一, 也是全球气候变化的重要指示器。北极海冰因其高反照率以及对大气与海洋之间热量、湿度和动量交换的影响, 在调节气候变化中发挥着十分重要的作用^[1]。北极海冰的减退以及气温的升高会导致经向温度梯度减弱从而使得北半球西风急流减弱^[3], 减弱的西风急流可能引起更多的冷空气入侵北半球中纬度地区^[4-5]。此外, 北极海冰输运是北极海冰物质平衡的重要一环, 不仅影响海冰面积, 而且影响全球大洋温盐环

流。输出的海冰融化后会降低海洋的表层盐度, 从而减弱海洋垂向混合, 并进一步影响北大西洋环流, 对局部乃至全球气候产生影响^[6]。北极海冰也具有重要的生态影响, 海冰面积的变化会引发生物群落的变化, 以及导致生物多样性和生态系统稳定性发生变化^[7]。因此, 准确获取北极海冰变化信息, 是研究极区生态环境、地球气候系统和极端天气事件等一系列重大问题的关键^[8]。

近几十年来的卫星观测数据表明, 自 1979 年以来, 北极海冰密集度呈减小趋势, 北极海冰范围也同样呈现显著减少的趋势^[9-10], 北极的平均海冰覆盖范围约以每 10 年超过 4% 的速率减少, 其中夏季最为显著, 其减小速率达到每 10 年 10%^[11]。与此同时, 北极海冰厚度明显变薄, 1958—2018 年, 接近融化季节结束时的海冰平均厚度减少了 2.0 m, 约 66%^[12]。此外, 在逐渐增强的穿极流和

[收稿日期] 2022 年 8 月收到来稿, 2022 年 11 月收到修改稿

[基金项目] 国家重点研发计划(2019YFA0607001)、上海市自然科学基金(22ZR1427400)、国家自然科学基金(42130402, 41706210)和南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队建设项目(311021009)资助

[作者简介] 查宇凡, 女, 1999 年生。硕士研究生, 主要从事极地海冰数模与观测相关研究。E-mail: zyf021@126.com

[通信作者] 张瑜, E-mail: yuzhang@shou.edu.cn

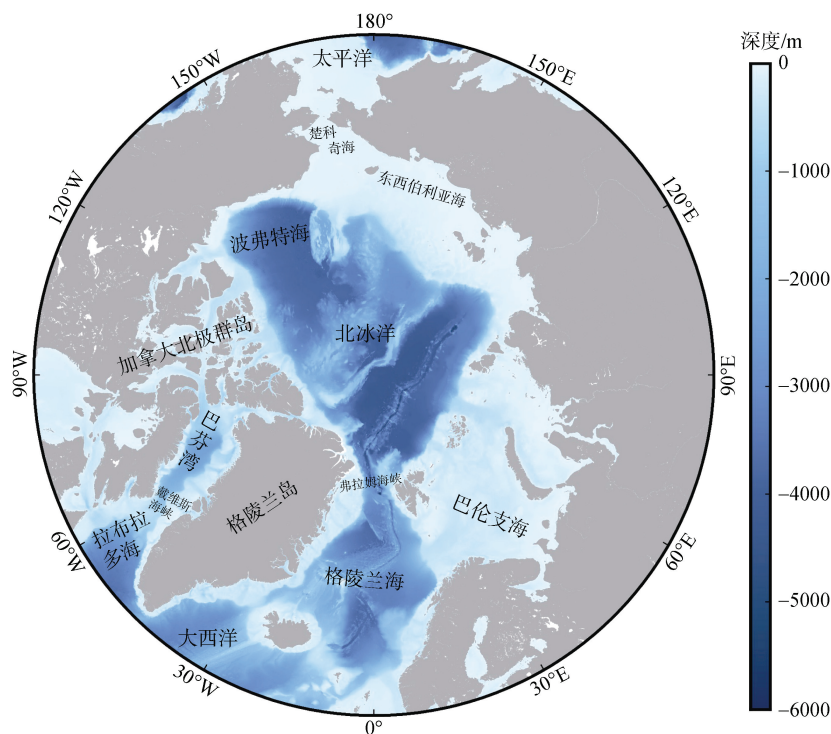


图1 北冰洋区域水深图

Fig.1. Bathymetric chart of the Arctic Ocean

速度更快、湍流更大的波弗特涡流两种运动作用下,超过90%的北极海冰在漂流速度上呈现加速趋势^[13]。

在北极海冰快速变化的背景下,对北极海冰变化的预估可加深对于气候变化的理解,对于阐明北冰洋对气候变化的响应机理具有重要作用。因此,北极海冰快速变化始终是国际研究的前沿和热点。尽管现有卫星及现场观测等方式获取数据,然而由于地理位置的限制以及恶劣的气候条件,目前的观测数据在时间连续性和空间覆盖性上仍有不足,而利用数值模式可有效弥补观测数据的缺失,尤其是当前对北极海冰未来变化的预估,数值模式是最重要的研究手段之一。对于从小时至月的时间尺度的基于数值模式的预估结果可称为短期预报,年际至年代际的时间尺度一般可称为中长期预估。从20世纪90年代开始,针对北极海冰短期预报与中长期预估的数值模式得到了快速发展,并在接下来的数十年中得到了较为广泛的应用,其中短期预报模式研究主要基于冰-海耦合模式或气-冰-海耦合模式,而中长期预估模式研究除了基于以上提及的模式之外,也基于多轮

国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)中的气候模式,目前最新的是第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)。然而由于不同数值模式在离散算法、水平和垂向分辨率、地形和海岸线拟合程度、驱动力数据以及开边界条件等多方面所采取的不同方案,导致模式之间的表现有着较大的差异,不同的海冰模块或版本会使得模拟结果有所差别,模式对于相关要素的预报预估结果不同,造成了对北极未来变化预估的不确定性。

因此,本文梳理了近几十年来国内外相关模式对北极海冰密集度、范围、面积、厚度和漂移速度等要素的短期预报及中长期预估的研究与应用,深入分析了短期预报和中长期预估模式的精度以及对北极海冰未来变化趋势的预估,并尝试提出一些模式亟待改善的新方面。

1 海冰密集度短期预报及中长期预估

1.1 短期预报

海冰密集度是海冰的重要参数之一,总体而

言,海冰密集度的短期预报效果较好,特别是海冰密集度的预报在加入了数据同化和集合大气强迫等技术后,模式预估的准确性明显提高。短期预报模式如表 1 所示,其水平格点分布见图 2。2015 年 Lemieux 等^[14]利用 RIPS 模式(表 1)对 2011 年进行了每天 4 次 48 h 的预报,该模式水平空间

分辨率为 $(1/12)^{\circ}$,在完整的季节周期内,模式验证结果表明 RIPS 模式 48 h 的预报误差在海冰生长季节小于初始场误差,而在融化期则大于初始场误差,在生长季节的预报结果与卫星观测数据高度一致。此外,研究还发现模式初始化时海冰边缘区精确程度极大地决定了 RIPS 预报的好

表 1 短期预报模式简称、全称及来源机构
Table 1. Abbreviations, full names and source institutions of short-term forecast models

序号	模式简称	模式全称	来源机构
1	ACNFS	U.S. Navy's Arctic Cap Nowcast/Forecast System	美国国家航空航天局斯坦尼斯航天中心(SSC)
2	ArcIOPS	Arctic Ice Ocean Prediction System	国家海洋环境预报中心(NMEFC)
3	CAFS	Coupled Arctic Forecast System	美国国家海洋和大气管理局(NOAA)
4	CESM2	Community Earth System Model version2	美国国家大气研究中心(NCAR)
5	CFSv2	Climate Forecast System version 2	美国国家环境预报中心(NCEP)
6	CNRM	Centre National de Recherches Meteorologiques-climate model	法国国家气象研究中心(CNRM)
7	COAWST	Coupled Ocean Atmosphere Wave Sediment Transport	美国地质调查所(USGS)和伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)
8	EC-Earth	Europe-wide consortium-Earth	欧洲地球科学联盟(EC-Earth-Consortium)
9	GEOS-5	NASA Goddard Earth Observing System Model-version 5	戈达德航天中心(NASA GSFC)
10	GFDL-FLOR	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory- Forecast-Oriented Low Ocean Resolution	美国地球物理流体动力学实验室(GFDL)
11	GloSea	Global Seasonal Forecast System	英国气象局(Met Office)
12	MITgcm	Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model	麻省理工学院(MIT)
13	MIZMAS	Marginal Ice Zone Modeling and Assimilation System	圣路易斯华盛顿大学(UW)
14	NAOSIM	North Atlantic-Arctic Ocean Sea Ice Model	阿尔弗雷德·魏格纳研究所暨亥姆霍兹极地海洋研究中心(AWI)
15	NEMO-LIM3	Nucleus for European Modelling of the Ocean- the Louvain-LaNeuve Sea Ice Model version3	NEMO联盟
16	NESM	Nanjing University of Information Science and Technology Earth System Model	南京信息工程大学(NUIST)
17	NRL-SUBX	Navy Research Lab-the Subseasonal Experiment	美国海军研究实验室(NRL)
18	PIOMAS	Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System	圣路易斯华盛顿大学(UW)
19	PIPS2.0	Polar Ice Prediction System 2.0	美国海军研究实验室(NRL)
20	RIPS	Regional Ice Prediction System	加拿大气象与环境预报中心(CCMEP)

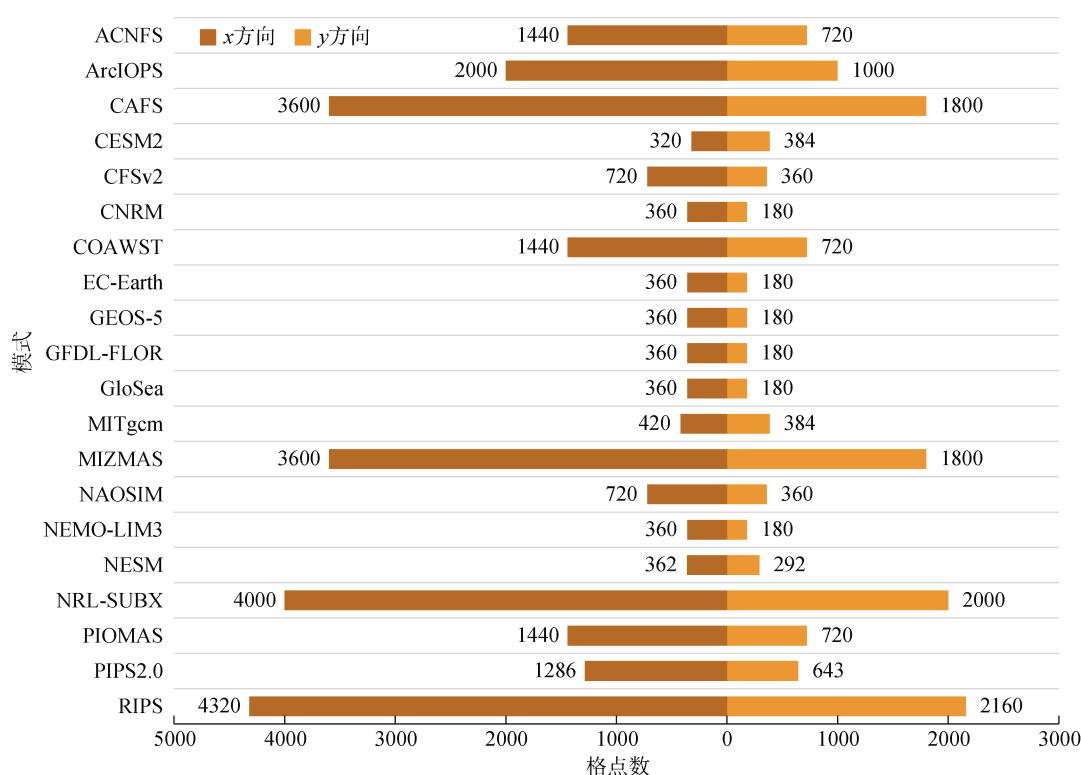


图 2 主流短期预报模式的水平格点分布

Fig.2. Grid point distribution of the main short term forecast models

坏。Hebert 等^[15]采用 ACNFS 模式(表 1)在 2014 年 2 月—2015 年 6 月期间每天提供 7 天的短期预报,该模式水平空间分辨率为 25 km,对海冰密集度的研究主要集中在随时间变化最快的海冰边缘区域。预报结果显示除 6 h 的预报外,其余的 30、54、78、102 和 126 h 预报均表现出了海冰密集度误差结果优于初始误差。而在与气候态平均结果的比较中,预报的海冰密集度的误差随着时间的增加而增大,这些误差产生的原因可能是由于过多的大气辐射、海水温度偏高以及海冰的参数化配置。

国内研究方面,2014 年 Yang 等^[16]基于 MITgcm 的冰-海耦合模式采用美国国家环境预测中心全球预测系统数据(National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System, NCEP-GFS)作为大气强迫,使用卫星专用传感器微波成像仪(Special Sensor Microwave Imager/Sounder, SSMI/S)和德国不莱梅大学的第 2 代先进微波辐射成像仪(Advanced Microwave Scanning Radiometer 2, AMSR2)获取的海冰数据作为初始

场对北极 2010 年夏季海冰密集度进行了短期预报,分析发现利用极地天气研究和预报模型(Polar Weather Research and Forecast Model, Polar WRF)大气数据驱动的海冰密集度预报数据展现出更好的结果,均方根误差仅在 0~0.01 之间。2016 年赵杰臣等^[17]基于牛顿松弛逼近(Nudging)资料同化方法将 AMSR2 海冰密集度资料同化到模式中,建立了北极海冰数值预报系统,他们定量分析了 3 种不同 Nudging 同化方案对北极海冰密集度的 24~120 h 预报结果的改进效果。研究发现 2012 年 7 月 25—29 日和 2012 年 8 月 26—30 日两组试验结果得到最优 Nudging 同化方案获得的海冰密集度初始场与 AMSR2 数据的平均误差小于 0.05,均方根误差小于 0.1^[17]。尤其在 85°N 以北高纬区域的海冰密集度模拟的精度明显增加,海冰密集度初始场与 AMSR2 数据的平均误差和均方根误差几乎为 0,逼近观测结果^[17]。CFSv2 模式(表 1)采用了 T126(~100 km)的水平分辨率对北极海冰进行多周预报,模式预报了 1999—2015 年期间每 45 天的短期预报结果,表明其对

于 9 月海冰密集度的预报能力最强,特别是对楚科奇海、波弗特海、东西伯利亚海的海冰预报的密集度距平与美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)的海冰观测数据的密集度距平相关系数值均在 0.6 以上,整个北冰洋的相关系数变化范围主要在 0.5~0.8 之间^[18]。2018 年 Mu 等^[19]发展了国内首个基于集合的北极海冰-海洋预报系统 ArcIOPS v1.0,该模式的水平空间分辨率为 18 km,评估结果表明该系统具有可靠的短期海冰预报能力,无论是在边缘区域还是在密集冰区,其海冰密集度 24 h 预报的均方根误差都低于 OSISAF 海冰密集度产品与 AMSR2 数据之间的差异,其中 ArcIOPS v1.0 在密集冰区预报的 24 h 均方根误差仅为 0.05。2020 年 Liang 等^[20]在 ArcIOPS v1.0 系统的基础上,进一步引入了海表面温度的遥感资料同化,对中国第 9 次北极科学考察期间海冰预报结果的评估表明,相对上一代版本,在海冰密集度的 24、72、120 和 168 h 的预报中均方根误差减小了 0.01~0.02。

除了利用单个数值模式对北极海冰密集度进行预报,近年来,有研究陆续地对多个数值模式间预报能力进行比较。2016 年 Blanchard-Wrigglesworth 等^[21]在研究中使用泛北冰洋模式和同化系统(Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System, PIOMAS)的海冰厚度场在 8 种不同的动力学模式中(CNRM、EC-Earth2.3、GEOS-5、CESM1、CFSv2、GIFS3.1、PIOMAS 和 NEMO-LIM3)进行初始化,对 2015 年北极夏季海冰进行了季节性预报,并与 NSIDC 的海冰密集度观测结果进行对比研究,结果显示单个模式模拟的结果与卫星观测数据的差异均在 0.3 左右,但模式与模式之间显示出较大的差异,部分区域的模式间海冰密集度模拟差异可达 0.4 以上,预报的不确定性较大。此外研究表明,在其他因素相同的情况下,消除不同时期的误差订正会导致预测的结果差异显著。2019 年 Wayand 等^[22]基于新发布的含有 16 个海冰预报模式的数据库,对 2018 年的海冰进行了分析比较,并运用布里尔分数(Brier Score, BS)来概率预报相对于测试样本的均方误差结果,BS 越接近 0 表明预报的效果越好,反之 BS 越接近 1 表明预报的效果越差,其中用于验证

的观测数据来自于 NSIDC 的国防气象卫星计划专用传感器微波成像仪(Defense Meteorological Satellite Program Special Sensor Microwave, DMSP SSM)。研究结果发现 2018 年 6—7 月的海冰密集度预报能力相对较低,模式与观测数据的 BS 的差异可达到 0.1。相比之下,在 2018 年 2—5 月以及 9—11 月的海冰密集度预报准确性较高,各个模式与观测数据的 BS 差异约在 0.02。

1.2 中长期预估

在海冰密集度的中长期预估方面,研究主要集中在第五次国际耦合模式比较计划(CMIP5)和 CMIP6 计划。CMIP5 和 CMIP6 模拟海冰密集度的长期变化趋势与观测是一致的,尤其是在使用误差订正后,海冰密集度的预估数据有显著改善。CMIP5 模式如表 2 所示,其水平格点分布见图 3; CMIP6 模式如表 3 所示,其水平格点分布见图 4。2012 年 Koenigk 等^[23]利用 CMIP5 中的 EC-Earth 模式进行了海冰密集度研究工作(表 2),该模式水平空间分辨率为 120 km,EC-Earth 预估数据显示 2080—2099 年期间巴伦支海的年平均海冰密集度变化最大,可达 0.3,而拉布拉多海和格陵兰海沿岸的海冰密集度变化差异均在 0.1 左右。2020 年王松等^[24]对 CMIP5 和 CMIP6 中 BCC-CSM 模式的海冰密集度历史数据模拟能力进行分析(表 2 和表 3)。通过 CMIP5 与 CMIP6 中海冰密集度的模拟趋势来看,二者预估的结果较为相似,但 CMIP6 计划中该模式模拟的 9 月海冰密集度减小趋势与观测数据更为接近,与美国国防气象卫星专用微波成像仪(Special Sensor Microwave/Image, SSM/I)卫星遥感数据的误差比 CMIP5 模拟的误差减小了 10%,同时,CMIP6 在巴芬湾南部和格陵兰岛南部的 3 月海冰密集度预估更接近于卫星观测数据,比 CMIP5 模拟的误差减小了 4%。CMIP5 与 CMIP6 计划下 BCC-CSM 模式误差产生的原因可能是大气模块及海冰模块物理参数化设置,特别是大气模块云物理过程和辐射、海冰反照率参数化方案通过增加向下短波辐射和反照率参数改善了冰表面热收支,同时对海洋热通量也有间接的影响。此外,有研究基于 16 个 CMIP6 模式对 2015—2100 年的 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 三个场景下北极海冰状况进行了预估研究,研究结果表明 CMIP6

表2 包含海冰数据的 CMIP5 模式简称、模式全称及来源机构
Table 2. Abbreviations, full names and source institutions of CMIP5 models with sea ice data

序号	模式简称	模式全称	来源机构
1	ACCESS1.0	Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science version 1.0	澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)
2	ACCESS1.3	Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science version 1.3	澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)
3	BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center Climate System Model version 1.1	国家气候中心(BCC)
4	BCC-CSM1.1-m	Beijing Climate Center Climate System Model version 1.1-m	国家气候中心(BCC)
5	BNU-ESM	Beijing Normal University Earth System Model	北京师范大学(BNU)
6	CanESM2	The Second Generation Canadian Earth System Model version 2	加拿大气候模拟和分析中心(CCCma)
7	CCSM4	Community Climate System Model version 4	美国国家大气研究中心(NCAR)
8	CESM1-BGC	Community Earth System Model version 1-Biogeochemistry	美国国家大气研究中心(NCAR)
9	CESM1-CAM5	Community Earth System Model version 1-Community Atmosphere Model version 5	美国国家大气研究中心(NCAR)
10	CESM1-WACCM	Community Earth System Model version 1-Whole Atmosphere Community Climate Model	美国国家大气研究中心(NCAR)
11	CMCC-CM	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici-Climate Model	欧洲-地中海气候变化中心(CMCC)
12	CMCC-CMS	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici-Climate Model with a resolved Stratosphere	欧洲-地中海气候变化中心(CMCC)
13	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques-climate model version 5	法国国家气象研究中心(CNRM)
14	EC-Earth	Europe-wide consortium-Earth	欧洲地球科学联盟(EC-Earth-Consortium)
15	FGOALS-g2	Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model Grid-point version 2	中国科学院(CAS)
16	FGOALS-s2	Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model Spectral version 2	中国科学院(CAS)
17	FIO-ESM	First Institute of Oceanography Earth System Model	自然资源部第一海洋所(FIO)
18	GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-climate model version 3	美国地球物理流体动力学实验室(GFDL)
19	GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Earth System Model 2G	美国地球物理流体动力学实验室(GFDL)
20	GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Earth System Model 2M	美国地球物理流体动力学实验室(GFDL)

续表

序号	模式简称	模式全称	来源机构
21	GISS-E2-H	Goddard Institute for Space Studies-Earth 2-H	戈达德太空研究所(NASA-GISS)
22	GISS-E2-H-CC	Goddard Institute for Space Studies-Earth 2-H-Community Climate	戈达德太空研究所(NASA-GISS)
23	GISS-E2-R	Goddard Institute for Space Studies-Earth 2-R	戈达德太空研究所(NASA-GISS)
24	GISS-E2-R-CC	Goddard Institute for Space Studies-Earth 2-R-Community Climate	戈达德太空研究所(NASA-GISS)
25	HadGEM2-AO	Hadley Centre Global Environmental Model 2 Arctic Ocean	英国气象局哈德利中心(MOHC)
26	HadGEM2-CC	Hadley Centre Global Environmental Model 2 Community Climate	英国气象局哈德利中心(MOHC)
27	HadGEM2-ES	Hadley Centre Global Environmental Model 2 Earth System	英国气象局哈德利中心(MOHC)
28	INM-CM4	Institute of Numerical Mathematics-climate model version 4	俄罗斯科学院 (RAS)
29	IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace-Climate Model 5A-Low Resolved	皮埃尔-西蒙-拉普拉斯研究所(IPSL)
30	IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace-Climate Model 5A-Middle Resolved	皮埃尔-西蒙-拉普拉斯研究所(IPSL)
31	IPSL-CM5B-LR	Institut Pierre-Simon Laplace-Climate Model 5B-Low Resolved	皮埃尔-西蒙-拉普拉斯研究所(IPSL)
32	MIROC-ESM	Model for Interdisciplinary Research on Climate- Earth System Model	东京大学大气海洋研究所/日本国立环境研究所/日本国立海洋研究开发机构 (AORI/NIES/JAMSTE)
33	MIROC-ESM-CHEM	Model for Interdisciplinary Research on Climate- Earth System Model-CHEM	东京大学大气海洋研究所/日本国立环境研究所/日本国立海洋研究开发机构 (AORI/NIES/JAMSTE)
34	MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5	东京大学大气海洋研究所/日本国立环境研究所/日本国立海洋研究开发机构 (AORI/NIES/JAMSTE)
35	MPI-ESM-LR	Max Planck Institute-Earth System Model-Low Resolved	马克斯-普朗克气象研究所(MPI-M)
36	MPI-ESM-MR	Max Planck Institute-Earth System Model-Middle Resolved	马克斯-普朗克气象研究所(MPI-M)
37	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute-coupled general circulation model version 3	日本气象研究所(MRI)
38	NorESM1-M	Norwegian Climate Center's Earth System Model 1-M	皮耶克尼斯气候研究中心(NCC)
39	NorESM1-ME	Norwegian Climate Center's Earth System Model 1-ME	皮耶克尼斯气候研究中心(NCC)

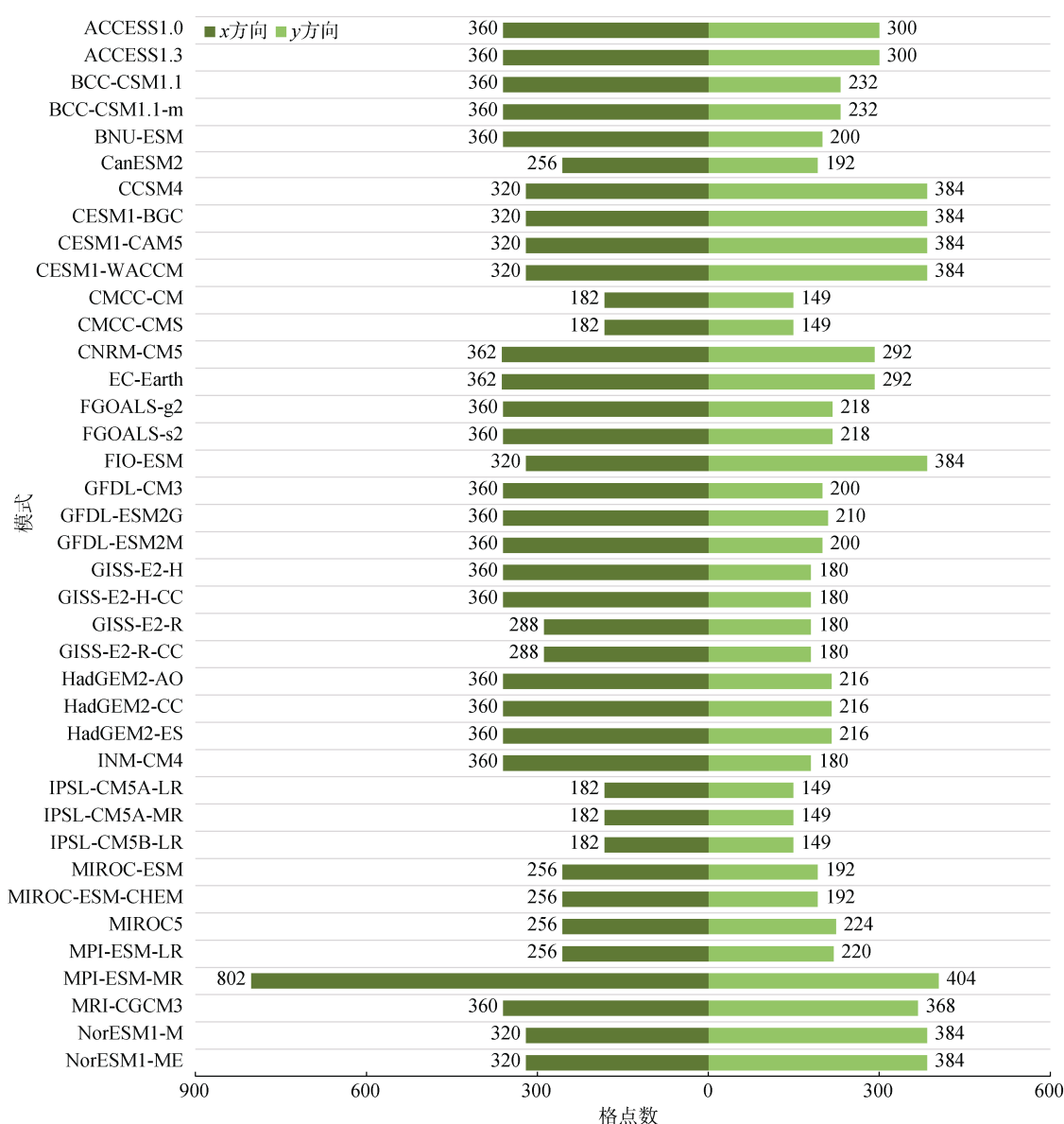


图 3 包含海冰数据的 CMIP5 模式水平格点分布
Fig.3. Grid point distribution of CMIP5 models with sea ice data

模式再现目前海冰密集度的能力有限, 将 CMIP6 模式的数据与 NSIDC 的海冰密集度的数据比较发现, CMIP6 模式整体上很大地低估了北极 9 月的海冰密集度, 误差在 22.6%~73.8%, 但在使用统计误差订正后, 模式的预估能力得到了显著改善, 优化后模式的误差在 4.4%~22.6%^[25]。

2 海冰范围和面积短期预报及中长期预估

2.1 短期预报

在海冰范围和面积方面, 通常将 15%作为确

定海冰边界的阈值。然而在不同的研究中得出的阈值不完全一致, 对于北极, 这个阈值可能在 15%~30%之间。对于北极海冰覆盖范围和面积的短期预报模式, 总体预报的准确性一般, 但部分短期预报模式同化了海冰密集度以及海冰厚度的数据, 同化后的准确性提高, 与观测数据的误差减小。2015 年 Peterson 等^[26]使用 GloSea4 模式(表 1)对 2011 年 9 月和 2012 年 9 月海冰覆盖范围进行了预报, 该模式的水平空间分辨率为 1°, 结果显示, 2011 年和 2012 年的 9 月预报平均值分别为 $(3.82 \pm 0.65) \times 10^6 \text{ km}^2$ 和 $(4.09 \pm 0.92) \times 10^6 \text{ km}^2$,

NSIDC的观测平均值分别为 $5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 和 $4 \times 10^6 \text{ km}^2$, 模式预报结果与观测数据的差异最大可达 $1.83 \times 10^6 \text{ km}^2$, 这些误差产生的原因可能是使用的大气强迫和冰-海耦合模型存在潜在的偏差。2016年赵杰臣等^[17]基于MITgcm模式使用了3种同化方案, 研究最优Nudging同化方案对于海冰面积的预报结果与AMSR2卫星观测结果的差异约为 $0.2 \times 10^6 \text{ km}^2$, 比没有使用同化方案时产生的误差减小了约 $0.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。此外, 也有研究使用PIOMAS模式(表1)的海冰厚度场进行初始化, 利用8种不同的动力学模式(CNRM、EC-Earth 2.3、GEOS-5、CESM1、CFSv2、GIFS3.1、PIOMAS和NEMO-LIM3)对2015年北极夏季海冰进行了季节性预测并与NSIDC数据的值相对比。8个模式9月海冰范围的平均模拟值为 $4.92 \times 10^6 \text{ km}^2$, 这与观测值 $4.63 \times 10^6 \text{ km}^2$ 较为一致, 但是模式与模式之间差异较大, 模式的海冰范围为 $3 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[21]。Blockley等^[27]在2018年的时候将CryoSat-2海冰厚度数据同化到GloSea模式中(表1), 该模式的水平空间分辨率为 $8.9 \sim 15.5 \text{ km}$, 同化后的GloSea模式预测结果显示2011—2015年间9月的海冰覆盖范围预报的准确性提高, 与NSIDC的观测数据相比整个北极范围内的误差减少了 $1.01 \times 10^6 \text{ km}^2$, 尤其在大西洋地区, 海冰边缘位置的准确性有了相当大的改善。CFSv2模式对1999—2015年北极海冰进行了多周预报, 预报结果表明提前3周预报的海冰覆盖范围的距平与NSIDC观测到的海冰覆盖范围的距平吻合良好, 相关系数可以达到0.66^[18]。

2.2 中长期预估

在北极海冰覆盖范围和面积的中长期预估方面, 大多数模式都可以很好地再现海冰生消的季节循环。相对于9月的海冰覆盖范围和面积而言, 3月的模式间差异要更大。各个模式海冰模拟出现误差的原因可能是多方面的, 使用不同的海冰模块或版本可能会使得模拟结果有所差别。CMIP5中的MRI-CGCM3模式(表2)对1979—2005年北极海冰进行历史模拟, 该模式采用的水平分辨率经度为 1° , 纬度为 0.5° , 结果表明MRI-CGCM3模式对所有年份的6—9月海冰面积的模拟较好, 与NSIDC观测的数据差异都小于 $2 \times 10^6 \text{ km}^2$, 然而该模式模拟的冬季到春季期间海

冰面积过大, 与NSIDC观测的数据差异最高可达 $8 \times 10^6 \text{ km}^2$, 造成高估海冰覆盖范围的原因可能是北大西洋暖流的作用^[28]。2012年Koenigk等^[23]利用EC-Earth模式对1860—2100年北极海冰进行了模拟, 其中在1980—2010年期间模式的海冰覆盖范围与NSIDC的年平均观测数据相比平均高估了约 $6 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的海冰范围, EC-Earth的海冰范围和变化趋势直到2030—2040年才与现在NSIDC的观测结果相似。作者考虑到模式对北极海冰覆盖范围存在高估的现象, 因此预估在2040年9月可能会出现北极无冰现象^[23]。2013年Notz等^[29]利用CMIP5中的MPI-ESM模式(表2)模拟了20世纪至21世纪的北极海冰的演变, 该模式的水平空间分辨率为 1.875° , MPI-ESM海冰范围与NSIDC的卫星观测的年际差异呈正态分布, 在整个21世纪, 1—5月标准差在 $0.3 \times 10^6 \text{ km}^2$ 左右, 8—10月标准差增大到 $0.7 \times 10^6 \sim 0.9 \times 10^6 \text{ km}^2$ 之间。此外, MPI-ESM模式还预估整个21世纪冬季海冰面积减少到约 $12 \times 10^6 \text{ km}^2$, 然后在23世纪末缓慢增加到 $13 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。对FIO-ESM模式(表3)在RCP(Representative Concentration Pathways)2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5这4种不同未来情景下分别进行了近百年(2006—2100年)的数值预估实验, 该模式的水平空间分辨率为 $1^\circ \times 0.27^\circ \sim 1^\circ \times 0.54^\circ$, 实验的结果表明21世纪北极海冰预估在不同情景下呈现不同的变化趋势。在RCP2.6情景下, 2006—2020年期间北极海冰覆盖范围略有下降, 随后呈现增加的趋势。在RCP4.5情景下, 2006—2040年期间北极海冰基本维持不变, 2040年以后北极海冰覆盖范围呈增加趋势, 但增加的速度小于RCP2.6的速度, 21世纪最后20年(2080—2100年)北极海冰覆盖范围又呈下降趋势。在RCP6.0情景下, 北极海冰基本维持不变, 冬季海冰略有增加, 夏季海冰略有减少。在RCP8.5情景下, 呈现继续衰减趋势, 冬季减少速度小于夏季减少速度, FIO-ESM模式预估2090年9月整个北极将没有海冰覆盖。此外, 与星载微波辐射计(Scanning Multichannel Microwave Radiometer and Special Sensor Microwave/Imager, SMMR和SSM/I)卫星数据相比较而言, 该模式能够很好地模拟出多年平均海冰覆盖范围的季节变化特征, 模拟的月平均

表3 包含海冰数据的 CMIP6 模式简称、模式全称及来源机构
Table 3. Abbreviations, full names and source institutions of CMIP6 models with sea ice data

序号	模式简称	模式全称	来源机构
1	ACCESS-CM2	Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science-Climate Model version 2	澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)
2	ACCESS-ESM1-5	Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science-Earth System Model version 1-5	澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)
3	AWI-CM-1-1-MR	Alfred Wegener Institute-Climate Model-1-1-Middle Resolved	阿尔弗雷德·魏格纳研究所暨亥姆霍兹极地海洋研究中心(AWI)
4	AWI-ESM-1-1-LR	Alfred Wegener Institute-Earth System Model-1-1-Low Resolved	阿尔弗雷德·魏格纳研究所暨亥姆霍兹极地海洋研究中心(AWI)
5	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center Climate System Model 2-Middle Resolved	国家气候中心(BCC)
6	BCC-ESM1	Beijing Climate Center Earth System Model version 1	国家气候中心(BCC)
7	CAMS-CSM1-0	Chinese Academy of Meteorological Sciences-Climate System Model version 1-0	中国气象科学研究院(CAMS)
8	CAMS-CSM2-0	Chinese Academy of Meteorological Sciences-Climate System Model version 2-0	中国气象科学研究院(CAMS)
9	CESM2	Community Earth System Model version 2	美国国家大气研究中心(NCAR)
10	CESM2-FV2	Community Earth System Model version 2-FV2	美国国家大气研究中心(NCAR)
11	CESM2-WACCM	Community Earth System Model version 2-Whole Atmosphere Community Climate Model	美国国家大气研究中心(NCAR)
12	CESM2-WACCM-FV2	Community Earth System Model version 2-Whole Atmosphere Community Climate Model-FV2	美国国家大气研究中心(NCAR)
13	CIESM	Community Integrated Earth System Model	清华大学(THU)
14	CMCC-CM2-HR4	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici-Climate Model version 2-HR4	欧洲-地中海气候变化中心(CMCC)
15	CMCC-CM2-SR5	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici-Climate Model version 2-SR5	欧洲-地中海气候变化中心(CMCC)
16	CMCC-ESM2	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici- Earth System Model version 2	欧洲-地中海气候变化中心(CMCC)
17	CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Meteorologiques-Climate Model version 6-1	法国国家气象研究中心(CNRM)
18	CNRM-CM6-1-HR	Centre National de Recherches Meteorologiques-Climate Model version 6-1-High Resolved	法国国家气象研究中心(CNRM)
19	CNRM-ESM2-1	Centre National de Recherches Meteorologiques-Earth System Model version 2-1	法国国家气象研究中心(CNRM)
20	CanESM5	Canadian Earth System Model version 5	加拿大气候模拟和分析中心(CCCma)
21	CanESM5-CanOE	Canadian Earth System Model version 5-CanadianOE	加拿大气候模拟和分析中心(CCCma)
22	E3SM-1-0	Energy Exascale Earth System Model-1-0	E级能源地球系统模型计划(E3SM-Project)
23	E3SM-1-1	Energy Exascale Earth System Model-1-1	E级能源地球系统模型计划(E3SM-Project)
24	E3SM-1-1-ECA	Energy Exascale Earth System Model-1-1-ECA	E级能源地球系统模型计划(E3SM-Project)
25	EC-Earth3	Europe-wide consortium-Earth version 3	欧洲地球科学联盟(EC-Earth-Consortium)
26	EC-Earth3-AerChem	Europe-wide consortium-Earth version 3-AerChem	欧洲地球科学联盟(EC-Earth-Consortium)
27	EC-Earth3-CC	Europe-wide consortium-Earth version 3-Community Climate	欧洲地球科学联盟(EC-Earth-Consortium)

续表

序号	模式简称	模式全称	来源机构
28	EC-Earth3-Veg	Europe-wide consortium-Earth version 3-Veg	欧洲地球科学联盟 (EC-Earth-Consortium)
29	EC-Earth3-Veg-LR	Europe-wide consortium-Earth version 3-Veg-Low Resolved	欧洲地球科学联盟 (EC-Earth-Consortium)
30	FGOALS-f3-L	Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model-f3-L	中国科学院(CAS)
31	FGOALS-g3	Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model, Grid-point version 3	中国科学院(CAS)
32	FIO-ESM-2-0	First Institute of Oceanography Earth System Model-2-0	自然资源部第一海洋所(FIO)
33	GFDL-CM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory- climate model version 4	美国地球物理流体动力学实验室 (GFDL)
34	GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory- Earth System Model version 4	美国地球物理流体动力学实验室 (GFDL)
35	GISS-E2-1-H	Goddard Institute for Space Studies-Earth version 2-1-H	戈达德太空研究所(NASA-GISS)
36	HadGEM3-GC31-LL	Hadley Centre Global Environmental Model version 3-GC31-LL	英国气象局哈德利中心(MOHC)
37	HadGEM3-GC31-MM	Hadley Centre Global Environmental Model version 3-GC31-MM	英国气象局哈德利中心(MOHC)
38	INM-CM4-8	Institute of Numerical Mathematics- Climate Model version 4-8	俄罗斯科学院(RAS)
39	INM-CM5-0	Institute of Numerical Mathematics- Climate Model version 5-0	俄罗斯科学院 (RAS)
40	IPSL-CM5A2-INCA	Institut Pierre-Simon Laplace-Climate Model 5A2-INCA	皮埃尔-西蒙-拉普拉斯研究所(IPSL)
41	IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace-Climate Model 6A-Low Resolved	皮埃尔-西蒙-拉普拉斯研究所(IPSL)
42	IPSL-CM6A-LR-INCA	Institut Pierre-Simon Laplace-Climate Model 6A-INCA	皮埃尔-西蒙-拉普拉斯研究所(IPSL)
43	KIOST-ESM	Korea Institute of Ocean Science and Technology- Earth System Model	韩国科学技术院(KIOST)
44	MIROC-ES2L	Model for Interdisciplinary Research on Climate- Earth System 2L	日本国立海洋研究开发机构 (JAMSTEC)
45	MIROC6	Model for Interdisciplinary Research on Climate version 6	日本国立海洋研究开发机构 (JAMSTEC)
46	MPI-ESM1-2-HAM	Max Planck Institute Earth System Model version 1-2-HAM	马克斯-普朗克气象研究所(MPI-M)
47	MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute Earth System Model version 1-2-High Resolved	马克斯-普朗克气象研究所(MPI-M)
48	MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute Earth System Model version 1-2-Low Resolved	马克斯-普朗克气象研究所(MPI-M)
49	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute- Earth System Model version 2-0	日本气象研究所(MRI)
50	NESM3	Nanjing University of Information Science and Technology Earth System Model version 3	南京信息工程大学(NUIST)
51	NorCPM1	Norwegian Climate Prediction Model version 1	皮耶克尼斯气候研究中心(NCC)
52	NorESM2-LM	Norwegian Earth System Model version 2-LM	皮耶克尼斯气候研究中心(NCC)
53	NorESM2-MM	Norwegian Earth System Model version 2-MM	皮耶克尼斯气候研究中心(NCC)
54	SAM0-UNICON	Seoul National University Atmosphere Model version 0 with a Unified Convection Scheme	首尔大学(SNU)
55	TaiESM1	Tai Earth System Model version 1	台湾中央研究院环境变迁研究中心 (RCEC)
56	UKESM1-0-LL	United Kingdom ESM version 1-0-LL	英国气象局哈德利中心(MOHC)

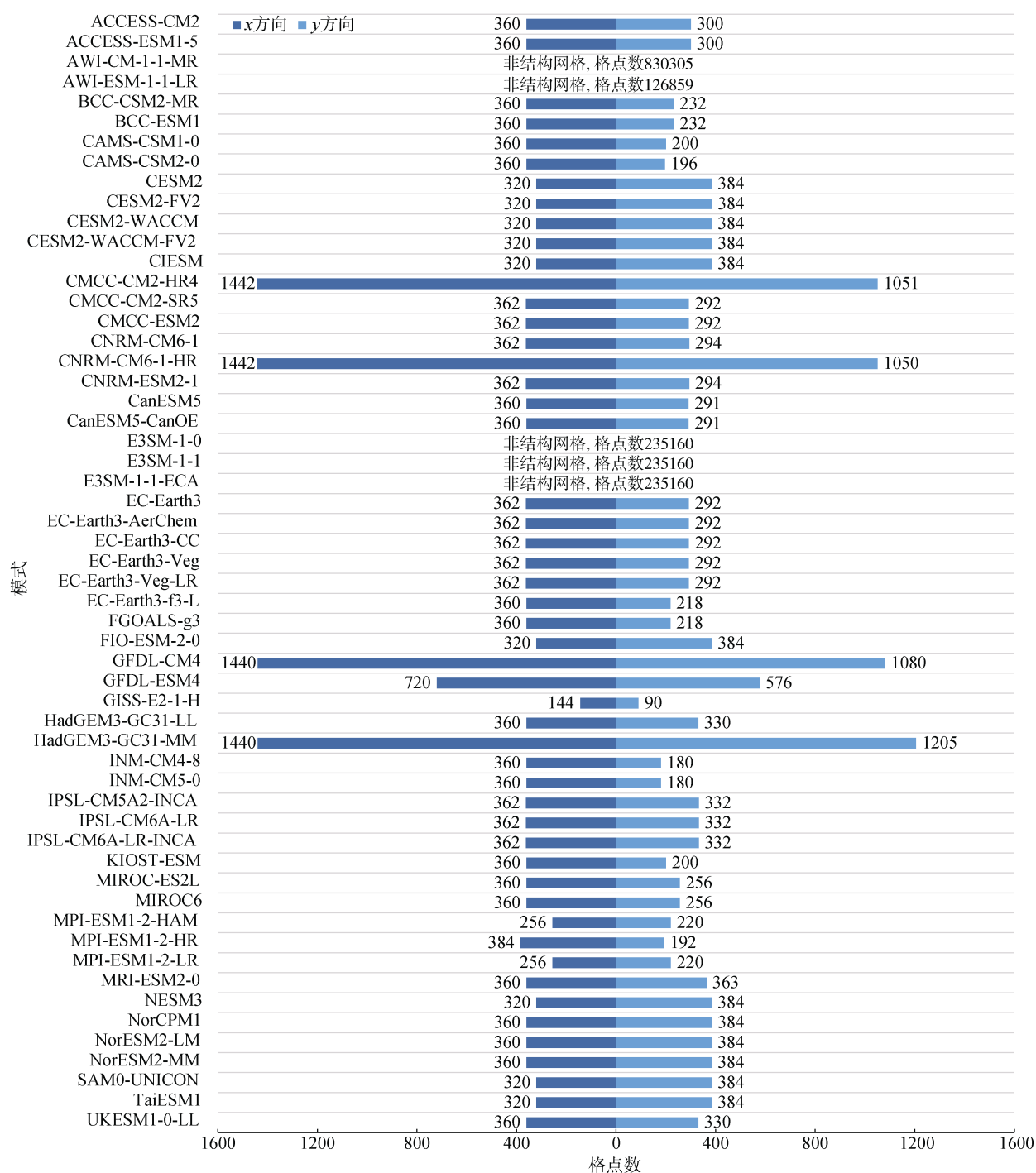


图4 包含海冰数据的CMIP6模式水平格点分布

Fig.4. Grid point distribution of CMIP6 models with sea ice data

海冰覆盖范围与卫星观测值的误差均在 $\pm 15\%$ 范围以内。FIO-ESM模式考虑了非破碎波浪导致的垂向混合,并且在有海冰的海域不考虑海浪的混合作用,因此非破碎波浪导致的垂向混合对北极海冰模拟的误差影响较小。但是非破碎波浪导致

的垂向混合可以对中低纬度海洋、大气过程产生巨大影响,而这些影响会通过向极热输送等大尺度过程对北极海冰模拟产生一定的误差^[30]。2016年朱清照和闻新宇^[31]使用我国开发并参加了CMIP5的6个模式(BCC-CSM1-1、BCC-CSM1-

1-m、BNU-ESM、FGOALS-g2、FGOALS-s2 和 FIO-ESM)对未来北极海冰的模拟情况进行了评估(表 2), 通过与 1979—2005 年海冰的 NSIDC 观测数据以及 21 世纪 50 年代的多模式集合平均值对比发现, 中国的气候模式对海冰范围的模拟结果与 CMIP5 模式的平均水平存在一定差距。其中 BNU-ESM、FGOALS-s2 和 FIO-ESM 对当前海冰范围模拟与观测数据差异在 $0.3 \times 10^6 \sim 0.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 之间。FGOALS-g2 对当前海冰范围的模拟显著偏多, 与 NSIDC 观测数据差异最大可达 $3.9 \times 10^6 \text{ km}^2$, 这导致其对未来海冰融化的估计也持续偏多, 在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下模式对 21 世纪 50 年代的预测值比多模式集合平均值分别高估了 $4.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ 和 $5.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。BCC-CSM1-1 和 BCC-CSM1-1-m 对当前海冰范围的模拟存在显著偏少的问题, 与 NSIDC 观测数据相比分别平均低估了 $1.9 \times 10^6 \text{ km}^2$ 和 $3.8 \times 10^6 \text{ km}^2$, 这导致其对未来海冰融化的估计也持续偏少, 这两个模式在 RCP4.5 情景下对 21 世纪 50 年代海冰范围的估计值已经小于多模式集合平均值在 RCP8.5 情景下的估计值。因此, FGOALS-g2 和 FIO-ESM 需要提高海冰对温度的敏感性, 而 BCC-CSM1-1、BCC-CSM1-1-m、BNU-ESM 和 FGOALS-s2 则需要略微降低海冰对温度的敏感性, 以期模拟出更准确、更贴近真实观测值的结果。CMIP5 中的 NorESM1-M 模式(表 2)采用了 1° 的水平空间分辨率, 该模式在预测 1 年长期的泛北极海冰覆盖范围时, 在大西洋附近地区的预测能力高于太平洋附近地区, 其中对巴伦支海的预测能力最高。另外, 在年代际尺度的预估方面, NorESM1-M 在预估拉布拉多海、巴伦支海和格陵兰海的海冰覆盖范围方面效果显著, 相关系数均在 0.75 以上^[32]。2021 年 Shu 等^[33]为了提高 FIO-ESM 模式对于北极海冰预估的准确性, 将 PIOMAS 的海冰密集度和海冰厚度同化到该系统中, 进行了为期 5 年(2014—2018 年)的北极海冰同化实验, 其中海冰密集度同化减小了误差 $0.55 \times 10^6 \text{ km}^2$, 海冰厚度同化误差比海冰密集度同化略大, 减小了 $0.46 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

近年来, 一些研究先后评估了 CMIP6 气候模式在模拟北极海冰覆盖方面的能力, 在 CMIP6 计划中开始出现分辨率为 25 km 的气候模式, 高分

辨率模式在北极海冰模拟方面具有更好的模拟结果。2020 年王松等^[24]研究了 1980—2015 年 CMIP5 与 CMIP6 计划下 BCC-CSM 模式对北极海冰的模拟能力。从海冰范围的年际变化比较来看, CMIP5 和 CMIP6 两个版本的表现均不理想。在夏季, CMIP5 与 SSM/I 观测之间的相关系数为 0.06, CMIP6 与 SSM/I 观测之间的相关系数为 -0.13。在冬季, CMIP5 与 SSM/I 观测之间的相关系数为 -0.34, CMIP6 与 SSM/I 观测之间的相关系数为 0.18。BCC-CSM 在 CMIP5 中模拟的海冰覆盖范围变化过大主要是由海洋热通量模拟的误差所造成的, 而在 CMIP6 模拟中具有较小海洋热通量、较小的净短波辐射及较大的反照率, 因此 CMIP6 的模拟结果有所改善。从海冰覆盖范围长期变化趋势而言, CMIP6 模拟结果较 CMIP5 稍好, CMIP6 在冬季和夏季都模拟出了与观测结果大致相同的减小趋势。有研究围绕 CMIP6 中 ACCESS-CM2、GISS-E2-1-G、GISS-E2-1-G-CC MRI-ESM2-0 和 NorESM2-MM 等 13 个模式的海冰面积进行, 海冰面积的观测数据是将 OSISAF、NASA-Team 和 Bootstrap 的海冰密集度产品数据进行融合并计算获得。CMIP6 不同模式模拟的 1979—1998 年 3 月平均海冰面积在 $12 \times 10^6 \sim 20 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的范围, 观测数据的平均值为 $14.4 \times 10^6 \text{ km}^2$, 该值处于模拟的范围之中。CMIP6 模式模拟的 1979—1998 年 9 月平均海冰面积在 $3 \times 10^6 \sim 10 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的范围之间, 观测数据的平均值为 $6 \times 10^6 \text{ km}^2$ 也处在模拟的范围之中。此外, 绝大多数 CMIP6 模式在 SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 四种排放情景下预估 2050 年之前北冰洋会出现几乎没有海冰的现象(海冰面积小于 $1 \times 10^6 \text{ km}^2$)^[34]。2021 年 Watts 等^[35]利用了 12 个 CMIP6 的模式研究发现 CMIP6 非常好地捕捉了 1979—2014 年的海冰覆盖范围变化趋势。此外, 虽然所有模式模拟的变化趋势幅度不同, 但总体与 1979—2014 年观察到的海冰覆盖范围变化一致, 均呈现下降趋势。所有 CMIP6 模式的平均下降速率为 $0.55 \times 10^6 \text{ km}^2 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 这与观测到的趋势 $-0.53 \times 10^6 \text{ km}^2 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 非常接近。同年 Shen 等^[36]评估了参与 CMIP6 的 36 个模式(表 3)及 24 个 CMIP5 对应模式(表 2)在模拟 1979—2014 年期间北极海冰覆盖面积方面的能力。结果表明, CMIP6 模拟的多模式集合平均值与观测值相比,

在所有月份的多模式集合的平均误差都小于15%, CMIP6多模式集合模拟的北极海冰范围与观测值吻合较好。CMIP5多模式集合模拟的1979—2014年9月海冰覆盖范围的下降 $33\%\pm 3\%$, 而CMIP6多模式集合模拟的1979—2014年9月海冰覆盖范围的下降 $22\%\pm 5\%$, CMIP6多模式集合模拟的平均海冰覆盖范围趋势与观测结果更加一致。此外, 大气模式分辨率对北极海冰和地面风变化的模拟有显著影响, 例如与CNRM-CM6-1模式相比, CNRM-CM6-1-HR中海洋和大气成分的较高分辨率降低了9月海冰覆盖范围趋势模拟的偏差。

3 海冰厚度短期预报及中长期预估

3.1 短期预报

相较于海冰范围和面积等预报工作, 海冰厚度短期预报研究相对较少。在海冰厚度的预报方面, 部分模式低估了小于2 m的海冰厚度, 而高估了大于2 m的海冰厚度, 预报的准确性一般。造成这些误差的动力因素可能是因为格陵兰岛北部的海冰漂移速度过高, 模式会模拟出厚冰向波弗特环流的输送, 同时也有可能是因为热力学因素所造成的。2002年Preller等^[37]使用了自1996年7月底以来每天提供120 h预报的PIPS2.0模式(表1), 采用了 0.28° 的水平空间分辨率(图2), 将SSM/I遥感数据同化到PIPS2.0中, 与美国国家/海军冰情中心(U.S. National/Naval Ice Center, U.S. NIC)提供的厚度数据进行比较, PIPS2.0模式平均低估了约1 m的海冰厚度。2019年Mu等^[19]运用了ArcIOPS模式(表1)对2017年夏季“雪龙”号极地考察船第1次穿越西北和中央航道进行海冰预报, 该模式采用了18 km的水平空间分辨率。实时预报从北京时间每天12:00(UTC 04:00)开始, 进行24、72和120 h的预报, 将预报的海冰厚度同时与ASPeCt (Antarctic Sea Ice Processes & Climate)的观测数据和PIOMAS冰厚再分析数据进行比较。总体而言ArcIOPS合理预报了“雪龙”号穿越北极通道期间的海冰厚度。在穿越航道期间, 观测的平均海冰厚度为1.53 m, ArcIOPS预报的平均海冰厚度为1.53 m(24 h预报)、1.52 m(72 h预报)和1.55 m(120 h预报), ArcIOPS对海冰厚度

的24 h预报结果比72 h和120 h预报的结果差值更小。然而PIOMAS低估了海冰厚度, 其平均值为1.06 m, 因此ArcIOPS在穿越航道期间的预报能力比PIOMAS系统更好。此外, 与ASPeCt观测数据相比, ArcIOPS预报低估了1.50~1.75 m范围内的海冰厚度, 高估了2.00~2.25 m范围内的海冰厚度。2019年Wayand等^[22]基于新发布的数据库分析了16个模式在2018年海冰融化期间的预测能力, 其中海冰观测数据来自于IceBridge Quicklook产品。研究发现在海冰厚度预测方面存在较大的模式间差异, 模式与观测数据存在一定差异, 其中GFDL-FLOR模式的均方根误差为1.44 m, CAFS模式的均方根误差为0.61 m, NRL-SUBX模式的均方根误差为1.30 m, 多模式集合的均方根误差为1.22 m。预报系统中的模式分辨率、数据同化和误差订正会对模式性能有很大的影响。2020年Yang等^[38]利用COAWST模式对2017—2018年海冰融化时期进行了预测(表1), 该模式的水平空间分辨率为25 km, 将预测结果与PIOMAS提供的海冰厚度日平均数据相比较, 结果显示COAWST对海冰厚度具有良好的预测准确性, 模式预测7月波弗特海北部、楚科奇海和东西伯利亚海的海冰厚度约为1.0~1.8 m。在8月和9月, COAWST预测东西伯利亚海北部的海冰厚度从1.6 m减小到0.6 m, 而波弗特海和楚科奇海北部的海冰厚度没有显著减少, 仍然大于1.2 m。但这些预测的海冰厚度相对于观测数据仍然偏高。在COAWST模式中, 海冰与其上面的大气和下面的海洋进行强烈的相互作用, 因此, 大气和海洋中的误差可能会降低模式对海冰的预测能力。2020年Liang等^[20]将两个版本ArcIOPS模式(v1.0和v1.1)在中国第9次北极科学考察期间的海冰厚度的结果与船载设备自动记录的海冰厚度值相比较, 两种版本对8月航行轨迹的海冰厚度变化预报效果都较好。两个版本ArcIOPS的8月海冰厚度均方根误差均小于0.34 m, 24 h预报和168 h预报的均方根误差均小于0.03 m。

3.2 中长期预估

对于海冰厚度的中长期预估相较于海冰覆盖范围和面积而言更具有难度, 模式的模拟结果与观测之间差距较大, 同时模式与模式之间的差异也较大。在时间方面, 同一模式3月的预估结果

要比 9 月更准确。2018 年 Blockley 和 Peterson^[27] 基于 GloSea5 模式评估 2011—2015 年海冰厚度的预测能力, 模式结果显示, 在冬季末期, 北冰洋盆地的年平均海冰厚度从 2.00 m 增加到 2.27 m, 增加了约 14%; 这种增长在北极大西洋地区最为明显, 该区域海冰厚度从 1.44 m 增加到 1.91 m, 增加了约 33%。波弗特海和楚科奇海的海冰厚度从 2.32 m 减少到 2.15 m, 减少了 7%。与观测数据相比, 模式预测的海冰厚度分布存在一定差异, 大西洋一侧的海冰较薄, 比 CryoSat-2 观测数据低 0.2~0.6 m, 而波弗特海附近的海冰较厚, 比 CryoSat-2 观测数据厚约 0.5 m, 造成这种误差的原因可能是模式中大气、海洋和海冰间的动量交换不足。

在 CMIP 计划方面, 2012 年 Koenigk 等^[23] 基于 CMIP5 中的 EC-Earth 版本预估了 2080—2100 年海冰厚度在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三种情景下的变化, 预估结果显示北极中部的海冰厚度减少相对均匀, 在 RCP2.6 情景中海冰厚度减少 1~1.5 m, 在 RCP4.5 情境中预估的海冰厚度减少约 2~3 m, 在 RCP8.5 情景中预估减少的海冰厚度达到 4 m。另有研究将 4 个全球气候模式(GFDL-CM3, HadGEM1.2, MPI-ESM-LR 和 EC-Earth V2) 进行理想实验, 建立了北极海冰的季节和年际可预测性的模式间比较, 结果表明模式之间的海冰厚度误差存在很大差异, 不同模式海冰厚度与观测的均方根误差约 0.1~0.2 m。此外, 所有模式均显示出冬季北冰洋近岸附近预报误差的放大, 该区域的模式与观测数据的均方根误差可达 0.5~0.6 m^[39]。2019 年王松等^[24] 利用 CMIP5 和 CMIP6 中 BCC-CSM 模式对 1980—2012 年逐月的历史数据与 PIOMAS 数据相比较, 以评估模式的海冰厚度模拟结果。空间平均海冰厚度的变化显示, CMIP5 与 CMIP6 的 4 月冰厚模拟结果非常接近, 且年际变化幅度很小, 平均冰厚约 1.5 m, 较 PIOMAS 数据低了 0.5~1.0 m。CMIP5 与 CMIP6 的 4 月海冰厚度变化趋势分别为 $-0.06 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $-0.08 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 较 PIOMAS 的 $-0.21 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 偏小。CMIP5 与 CMIP6 模拟的 9 月平均海冰厚度都不足 1 m, 较 PIOMAS 低了 0.2~1.5 m, CMIP5 的 9 月海冰厚度变化趋势为 $-0.03 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, CMIP6 为 $-0.09 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 远不如 PIOMAS 的

$-0.28 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 明显。CMIP5 与 CMIP6 的模拟结果相比, CMIP6 对夏季海冰厚度模拟有一定程度的改善。对比 PIOMAS 模式的海冰厚度, CMIP 两个版本模拟的海冰厚度全年都偏小, 原因主要为净短波辐射偏大引起的冰面热收支偏大及海洋热通量偏大。CMIP6 模拟的海冰厚度仍明显偏小, 但夏季较 CMIP5 有所改善, 改善的主要原因在于 CMIP6 模拟的短波辐射和海洋热通量与观测数据更接近。2020 年 Wei 等^[25] 基于 16 个 CMIP6 模式的海冰厚度开展研究, 结果发现, CMIP6 模式模拟海冰厚度空间分布的能力有限, 1979—2014 年北极 9 月海冰厚度与 PIOMAS 数据存在 -87.3% ~ 160.9% 的显著差异。但在使用误差订正后, 模式结果与观测值的空间相关系数大于 0.9, 海冰厚度的差异降低到 0.2%~22.7%。据 CMIP6 模式预估, 随着时间的推移, 北极 9 月海冰不断变薄, 到 21 世纪末(2086—2100 年), 在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 这 3 种情景下, 海冰厚度大于 120 cm 的区域将减少 34%~100%。2021 年 Watts 等^[35] 对比了 12 个 CMIP6 模式模拟的 1979—2014 年海冰厚度, 其中 6 个模式(CanESM5、CESM2、CESM2-WACCM、FGOALS-f3-L、IPSL-CM6A-LR 和 MIROC6)与 PIOMAS 的海冰厚度相比较, 显示了合理的海冰厚度分布, 模式结果与 PIOMAS 的均方根误差在 0.43~0.59 m 之间。在 9 月海冰模拟中, 这 6 个模式也在加拿大北极群岛和格陵兰岛的北部保持了相当数量的厚冰(大于 3.0 m), 模式与 PIOMAS 的均方根误差在 0.56~0.70 m 之间。此外, 在 2003—2008 年期间, 12 个模式与 ICESat 卫星观测数据的海冰厚度相关性较低(0.18~0.46), 均方根误差为 0.73~1.38 m。12 个模式结果与 2011—2014 年 CryoSat-2 卫星观测数据相比, 所有模式均显示出比与 ICESat 更大的相关性(0.47~0.65), 均方根误差较小, 为 0.63~0.92 m。

4 海冰漂移速度短期预报及中长期预估

4.1 短期预报

由于海冰漂移速度预报难度很大, 关于海冰漂移速度预报的研究也相对较少。1989 年, Preller 和 Posey^[40] 使用 PIPS 模式(表 1)从 1987 年 9 月 1 日开始每天进行 120 h 的预报, 该模式采用了

127 km 的水平空间分辨率, 将 PIPS 预报的海冰漂移速度与华盛顿大学极地科学中心“北冰洋浮标计划”监测的北极漂流浮标相比较, 1987 年模式预报的漂移速度与北极浮标的均方根误差为 $0.0692\sim 0.1168\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 1988 年模式预报的漂移速度与北极浮标的均方根误差为 $0.0473\sim 0.1110\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2015 年 Hebert 等^[15]利用 ACNFS 模式对 2014 年 2 月—2015 年 6 月的北极海冰每天提供 7 天的短期预报, 他们将海冰漂移速度与 IABP 浮标(the International Arctic Buoy Programme)报告的数据进行了比较。结果表明在 2014 年 6—10 月的预报时间内, ACNFS 模拟的海冰漂移速率都低于 IABP 浮标速率, 其中 8 月的最大速度差约为 $2\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。相比之下, 在 2014 年 11 月—2015 年 5 月, ACNFS 模式多数预报的海冰漂移速度大于 IABP 浮标。值得注意的是, 在夏季和秋季, 模式预报的第 54 h 及之后时间段内的海冰漂移速度表现更好, 而在冬季和春季, 预报结果通常则相反。2015 年 Schweiger 和 Zhang^[41]使用 MIZMAS 系统(表 1)生成 2014 年夏季 6 h 至 9 天的北极海冰漂移预报, 该模式的水平空间分辨率为 10 km, 浮标数据来自于 2014 年 7 月 17 日—9 月 25 日期间的 IABP 浮标。结果表明 MIZMAS 模式预报的漂移速度与 IABP 浮标的均方根误差从预报的 0~24 h 内的小于 $4.5\text{ km}\cdot\text{d}^{-1}$ (约 $5.2\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)上升到 24 h 至 9 天内的 $8\text{ km}\cdot\text{d}^{-1}$ (约 $9.3\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$), 预报开始以后的前 72 h, 速度的矢量相关系数较高, 高于 0.82。观测到的轨迹和预报轨迹之间的系统误差分析表明, 模式的速率偏慢约 10%, 方向差异约为 5° 。此外, 通过改进大气强迫可能会进一步减少预报误差。

4.2 中长期预估

在中长期方面, 海冰漂移一般不具备可预估性, 仅在大尺度的流场形态和流速方面模式具备一定的模拟能力。2013 年 Notz 等^[29]利用 MPI-ESM 模式模拟了 20 世纪至 21 世纪的北极海冰的演变, 与 IABP 浮标提供的漂移速度数据相比, MPI-ESM 模式模拟的 1979—2005 年期间 3 月北极海冰漂移矢量通常比 IABP 浮标高约 $6\text{ km}\cdot\text{d}^{-1}$ (约 $6.9\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$), 尤其在弗拉姆海峡和戴维斯海峡区域的差异较大, 模式预测的流速是观测数据的 2 倍多, 因此 MPI-ESM 模式对于北极海冰漂移速度的预测存在一定的不足。

在使用 CMIP6 计划模式对海冰漂移速度的预估方面, 2022 年 Yu 等^[42]评估了中国参与 CMIP6 的 9 个耦合模式(BCC-CSM2-MR、BCC-ESM1、CAMS-CSM1-0、CAMS-ESM2-0、CIesm、FGOALS-f3-L、FGOALS-g3、FIO-ESM-2-0 和 NESM3, 表 3)在 1979—2014 年海冰漂移的模拟能力。NSIDC 卫星观测数据显示 1979—2014 年北极海冰月平均漂移速度变化范围为 $2.36\sim 4.14\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。大多数模式合理地展现了波弗特环流和穿极流, 但其中的 5 个模式(BCC-CSM2-MR、BCC-ESM1、CAMS-CSM1-0、FGOALS-f3-L 和 FIO-ESM-2-0)高估了北极所有的月平均海冰漂移速度。9 个模式中, 只有 FGOALS-g3 可以较好模拟 1979—2014 年春季和秋季海冰漂移速度显著增加的特点, 但增加的幅度比实际观测要小。CAS-ESM2-0 高估了 7—9 月海冰漂移速度, 低估了其他月份海冰漂移速度。NESM3 高估了 3—10 月海冰漂移速度, 特别是在 7 月高估了 $3.38\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 其余月份速度低于观测速度。CIesm 高估了 12—7 月的海冰漂移速度, 在其他低估的月份中, 9 月的海冰漂移速度接近于 0。当改变近地表风和表层洋流后, 北极海冰漂移速度与表层海流速度趋势的关系明显改善。因此, 北极海冰漂移与表层洋流之间存在较大的不确定性。未来, 对模式之间的空气-冰和冰-海洋阻力系数误差的研究有助于改善模式中海冰漂移速度的预估准确性。

5 总结与展望

5.1 总结

本研究针对气候变化背景下北极海冰未来的变化预估, 聚焦海冰密集度、海冰范围和面积、海冰厚度以及海冰漂移速度等关键要素, 对目前国内有关北极海冰短期预报模式和中长期预估模式两方面的研究成果进行了深入分析及梳理并得到以下主要结论。

1. 目前, 针对海冰不同要素预估的研究工作存在较大的数量差异, 其中, 对海冰密集度、海冰范围及面积和海冰厚度的短期预报和中长期预估研究较多。相较于北极海冰短期预报的研究, 中长期预估模式方面的工作相对较少, 主要集中在 CMIP 计划的多模式验证和对比。

2. 在海冰的短期预报方面,不同模式之间对于海冰密集度、覆盖范围和面积以及厚度等要素的预报结果差异相对较大,使用同化技术的预报模式可有效改善海冰密集度和海冰厚度的预报误差,以及相应海冰覆盖范围和面积的估算。相比之下,对于海冰漂移速度的预报研究较少,并且预报的准确性一般。海冰短期预报误差主要由海冰的参数化配置、误差订正技术、大气强迫以及热力学因素等造成。

3. 在海冰的中长期预估方面,大部分研究集中在各个参与 CMIP 计划的模式中。造成海冰预估差异的主要因素包括模式的分辨率、海冰模块、驱动力等因素。在海冰密集度方面,总体而言,CMIP6 比 CMIP5 模拟的误差有所改善,在部分模式的综合研究中,CMIP6 与卫星观测的误差相比 CMIP5 减小了 10%。此外,部分 CMIP6 模式很大程度上低估了北极 9 月的海冰密集度,但在使用统计差异修正技术后,模式的误差可从 22.6%~73.8%减小到 4.4%~22.6%。对于海冰覆盖范围和面积的中长期预测和模拟预估方面的研究较多,北极海冰在不同 RCP 情景下呈现不同的变化趋势。在对历史数据的验证方面,部分 CMIP6 模式集合模拟的海冰覆盖范围结果比 CMIP5 更接近观测数据,所有月份的多模式集合的平均误差都小于 15%,在本文综述的研究中,大多数模式都低估了海冰覆盖范围的下降趋势。在海冰厚度的中长期预测和模拟预估方面,部分模式预测的海冰厚度分布存在一定差异,大西洋一侧的海冰预测偏薄,而波弗特海附近的海冰预测偏厚。在使用同化技术和统计误差修正技术之后,部分 CMIP6 模式与观测数据的差异可减小到 0.2%~22.7%。海冰漂移速度方面的中长期预测和模拟预估研究极少,在本文综述的研究中发现,大多数模式合理地展现了波弗特环流和穿极流,但模拟的结果都高估了观测的海冰漂移速度,模式均存在改进的空间。

5.2 展望

海冰作为气候系统中重要的组成部分,其变

化显著影响着海洋与上层大气之间的动量、热量和物质交换,改善和提高各类模式对北极海冰预报预估的准确性,有助于加深对将来北极海冰变化的了解,为有效应对气候变化提供数据支撑。目前关于北极海冰短期预报以及中长期预估模式的研究还有一些值得关注和待解决的问题。

1. 由于不同模式之间参数化设置、分辨率、驱动力等因素的差异,各模式对北极海冰的预估能力仍然存在较大的不确定性,未来应进一步加强各模式之间的联系,针对每个模式在海冰预估方面所表现出的不同特点,分析影响其能力的关键因素,明确有利于预估准确性的因素并进行应用推广,从而提高模式精度提供出新的方案。

2. 目前,可利用的对短期预报和中期预估模式海冰结果的验证数据仍然不足。其中,由于现场的实地观测数据通常采用钻孔、船测、电磁感应和冰浮标等方式,数据往往要等观测计划结束之后再进行初步的处理、校正,所以数据的公开通常需要数月乃至更久,最新观测数据获取不及时。此外,卫星数据受观测技术限制,数据的时间连续性不理想,在一些月份海冰关键数据如海冰厚度等会产生缺失,并且不同方式反演的海冰数据差异较大。因此,应加强实地观测数据获取的时效性,并积极提高卫星观测数据的时间连续性和反演准确性,这不仅可提高模式验证的可信度及时效性,也可利用数据同化技术矫正预报模式和预估模式的误差。

3. 由于海-冰-气之间的相互作用,海洋与大气对海冰的预报和预估有着关键的影响。因此,为进一步改进模式的预估精度,海洋与大气数据的准确性也需要同时得到改善,此外模式预估的时效性也需要有所保障,尤其是短期预报需要能够及时提供海冰预报数据。海洋-海冰-大气的全耦合模式是海冰预报与预估的理想选择,如何将各模块之间的相互作用进行有效耦合是未来海冰预估工作的关键。

参考文献

- 1 BEKRYAEV R V, POLYAKOV I V, ALEXEEV V A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(14): 3888-3906.

- 2 COHEN J, SCREEN J A, FURTADO J C, et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(9): 627-637.
- 3 YAO Y, LUO D, DAI A, et al. Increased quasi stationarity and persistence of winter Ural blocking and Eurasian extreme cold events in response to Arctic warming. part I: Insights from observational analyses[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30: 3549-3568.
- 4 WALSH J E. Intensified warming of the Arctic: Causes and impacts on middle latitudes[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 117: 52-63.
- 5 DI CAPUA G, COUMOU D. Changes in meandering of the Northern Hemisphere circulation[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9): 094028.
- 6 唐述林, 秦大河, 任贾文, 等. 极地海冰的研究及其在气候变化中的作用[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(1): 91-100.
- 7 郝伟杰, 肖晓彤, 赵美训. 生物标志物 IP₂₅ 在北极海冰变化重建中的研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(4): 56-65.
- 8 BHATT U S, WALKER D A, WALSH J E, et al. Implications of Arctic sea ice decline for the earth system[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2014, 39: 57-89.
- 9 KWOK R, CUNNINGHAM G F, WENSNAHAN M, et al. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C7): C07005.
- 10 MASLANIK J A, FOWLER C, STROEVE J, et al. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(24): L24501.
- 11 ZHANG Y, CHEN C S, BEARDSLEY R C, et al. Seasonal and interannual variability of the Arctic sea ice: A comparison between AO-FVCOM and observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(11): 8320-8350.
- 12 KWOK R. Arctic Sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: Losses and coupled variability (1958–2018)[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(10): 105005.
- 13 PEROVICH D, RICHTER-MENGE J, POLASHENSKI C, et al. Sea ice mass balance observations from the North Pole Environmental Observatory[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(6): 2019-2025.
- 14 LEMIEUX J F, BEAUDOIN C, DUPONT F, et al. The Regional Ice Prediction System (RIPS): Verification of forecast sea ice concentration[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 142(695): 632-643.
- 15 HEBERT D A, ALLARD R A, METZGER E J, et al. Short-term sea ice forecasting: An assessment of ice concentration and ice drift forecasts using the U.S. Navy's Arctic Cap Nowcast/Forecast System[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(12): 8327-8345.
- 16 YANG Q H, LIU J P, ZHANG Z H, et al. Sensitivity of the Arctic sea ice concentration forecasts to different atmospheric forcing: A case study[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(12): 15-23.
- 17 赵杰臣, 杨清华, 李明, 等. Nudging 资料同化对北极海冰密集度预报的改进[J]. *海洋学报*, 2016, 38(5): 70-82.
- 18 LIU Y Y, WANG W Q, KUMAR A. Multiweek prediction skill assessment of Arctic Sea ice variability in the CFSv2[J]. *Weather and Forecasting*, 2018, 33(5): 1453-1476.
- 19 MU L J, LIANG X, YANG Q H, et al. Arctic Ice Ocean Prediction System: Evaluating sea-ice forecasts during *Xuelong's* first trans-Arctic Passage in summer 2017[J]. *Journal of Glaciology*, 2019, 65(253): 813-821.
- 20 LIANG X, ZHAO F, LI C H, et al. Evaluation of ArcIOPS sea ice forecasting products during the ninth CHINARE-Arctic in summer 2018[J]. *Advances in Polar Science*, 2020, 31(1): 14-25.
- 21 BLANCHARD-WRIGGLESWORTH E, BARTHÉLEMY A, CHEVALLIER M, et al. Multi-model seasonal forecast of Arctic sea-ice: Forecast uncertainty at pan-Arctic and regional scales[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 49(4): 1399-1410.
- 22 WAYAND N E, BITZ C M, BLANCHARD-WRIGGLESWORTH E. A year-round subseasonal-to-seasonal sea ice prediction portal[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(6): 3298-3307.
- 23 KOENIGK T, BRODEAU L, GRAVERSEN R G, et al. Arctic climate change in 21st century CMIP5 simulations with EC-Earth[J]. *Climate Dynamics*, 2013, 40(11): 2719-2743.
- 24 王松, 苏洁, 储敏, 等. BCC_CSM 对北极海冰的模拟: CMIP5 和 CMIP6 历史试验比较[J]. *海洋学报*, 2020, 42(5): 49-64.
- 25 WEI T, YAN Q, QI W, et al. Projections of Arctic sea ice conditions and shipping routes in the twenty-first century using CMIP6 forcing scenarios[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 104079.
- 26 PETERSON K A, ARRIBAS A, HEWITT H T, et al. Assessing the forecast skill of Arctic Sea ice extent in the GloSea4 seasonal prediction system[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 44(1): 147-162.

- 27 BLOCKLEY E W, PETERSON K A. Improving Met Office seasonal predictions of Arctic sea ice using assimilation of CryoSat-2 thickness[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(11): 3419-3438.
- 28 YUKIMOTO S, ADACHI Y, HOSAKA M, et al. A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3—Model description and basic performance—[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2012, 90A: 23-64.
- 29 NOTZ D, HAUMANN F A, HAAK H, et al. Arctic sea-ice evolution as modeled by Max Planck Institute for Meteorology's Earth system model[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, 5(2): 173-194.
- 30 舒启, 乔方利, 宋振亚. 地球系统模式 FIO-ESM 对北极海冰的模拟和预估[J]. *海洋学报*, 2013, 35(5): 37-45.
- 31 朱清照, 闻新宇. 中国 CMIP5 模式对未来北极海冰的模拟偏差[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(4): 276-285.
- 32 DAI P X, GAO Y Q, COUNILLON F, et al. Seasonal to decadal predictions of regional Arctic sea ice by assimilating sea surface temperature in the Norwegian Climate Prediction Model[J]. *Climate Dynamics*, 2020, 54(9/10): 3863-3878.
- 33 SHU Q, QIAO F L, LIU J P, et al. Arctic sea ice concentration and thickness data assimilation in the FIO-ESM climate forecast system[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40(10): 65-75.
- 34 NOTZ D, COMMUNITY S. Arctic sea ice in CMIP6[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(10): e2019GL086749.
- 35 WATTS M, MASLOWSKI W, LEE Y J, et al. A spatial evaluation of Arctic sea ice and regional limitations in CMIP6 historical simulations[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(15): 6399-6420.
- 36 SHEN Z L, DUAN A M, LI D L, et al. Assessment and ranking of climate models in Arctic sea ice cover simulation: From CMIP5 to CMIP6[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(9): 3609-3627.
- 37 Preller R H, POSEY P G, MASLOWSKI W, et al. Navy sea ice prediction systems[J]. *Oceanography*, 2002, 15(1): 44-56.
- 38 YANG C Y, LIU J, XU S. Seasonal Arctic sea ice Prediction using a newly developed fully coupled regional model with the assimilation of satellite sea ice observations [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2020, 12(5): e2019MS001938.
- 39 TIETSCHKE S, DAY J J, GUEMAS V, et al. Seasonal to interannual Arctic sea ice predictability in current global climate models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(3): 1035-1043.
- 40 PRELLER R, POSEY P G. The Polar Ice Prediction System—A Sea Ice Forecasting System[M]. Mississippi: Stennis Space center, 1989.
- 41 SCHWEIGER A J, ZHANG J L. Accuracy of short-term sea ice drift forecasts using a coupled ice-ocean model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(12): 7827-7841.
- 42 YU X Y, LIU C Y, WANG X C, et al. Evaluation of Arctic sea ice drift and its relationship with near-surface wind and ocean current in nine CMIP6 models from China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39(6): 903-926.

Study of short term forecast and medium-long term prediction of Arctic sea ice: A review

Zha Yufan¹, Zhang Yu^{1,2}, Chen Changsheng³, Xu Danya²

(¹College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

²Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China;

³School for Marine Science and Technology, University of Massachusetts Dartmouth, New Bedford, Massachusetts 02744, USA)

Abstract

In the current global warming context, rapid changes in Arctic sea ice have a significant impact on the environment, the hydrological conditions and ecosystems of the Arctic Ocean. As an important indicator of global climate change, accurate predictions of future changes in Arctic sea ice contribute to the understanding and awareness of climate change trends in the Arctic and even globally. At present, numerical models are

one of the most important means to effectively estimate future changes in sea ice, but due to the many factors affecting the accuracy of the patterns, the estimated results between the models vary greatly. Therefore, this paper sorted out the current research progress on short term forecast and medium-long term prediction models of the Arctic Ocean at home and abroad, focusing on the simulation accuracy of the key elements in the Arctic sea ice such as the concentration, extent and area, thickness and drift speed of various models. It analyzed the prediction of the future change trend of Arctic sea ice in the current stage of the model. In addition, on the basis of previous research, the research and application of future numerical models in the prediction of Arctic Ocean sea ice are prospected.

Keywords Arctic, sea ice, forecast, prediction, model