

未来中国近海海冰变化特征的预估研究

祖子清, 凌铁军, 张蕴斐, 刘煜, 唐茂宁

(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)

摘要: 基于耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)的全球气候预估数据, 分析了黄、渤海区域内海表面2 m气温的增量, 并将该增量叠加在1978—2008年的再分析气象场上, 驱动海冰—海洋耦合模式, 对2015—2045年黄、渤海的海冰变化特征进行了预估。结果显示: 在RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5 4种排放情景下, 辽东湾、渤海湾、莱州湾和黄海北部4个海湾的海冰均呈现显著减少的趋势。但随着排放增多, 4个海湾的海冰并非单调的减少, 而在RCP4.5下减少最多, RCP6.0和RCP8.5次之, RCP2.6最少。对4种情景下的海冰冰情进行平均, 可以发现4个海湾结冰面积依次减少438、121、23和84 km²; 结冰范围依次减少9、7、2和7 nmi(海里, 1 nmi=1.852 km)。就整个黄、渤海而言, 未来31 a内结冰面积减少24%, 结冰范围减少19%, 持续天数缩短10%。

关键词: 耦合模式比较计划第五阶段; 渤海和黄海北部; 未来海冰预估; 2 m气温

中图分类号: P731.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2016)05-0001-08

1 引言

渤海和黄海北部是我国边缘海中唯一的结冰海域, 也是全球纬度最低的结冰海域之一。同时, 黄、渤海是我国重要的经济区, 因此海冰对航运、海上油气勘探和生产以及水产养殖均存在不同程度的影响^[1]。另外, 海冰是气候系统中的重要成员, 对全球气候具有调制作用, 其自身也受到气候变化的显著影响^[2]。因此开展未来海冰的预估工作, 无论对于社会生产还是理论研究, 都具有重要的意义。

渤海和黄海北部的海冰受到西伯利亚高压^[3]、太平洋副热带高压^[4]和太阳周期变化^[5]等多种气候因素的影响, 呈现了多时间尺度的变化特征^[6]。在全球变暖的背景下, 黄、渤海冬季的气温也呈现出明显的变暖趋势。在1951—2010年内, 后30 a较前30 a气温升高了1.6 °C。受其影响, 黄、渤海海冰的冰情等级下降了0.6级^[7]。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,

IPCC)第五次评估报告指出, 相对于1850—1900年, 在多数温室气体排放情景下, 21世纪末全球表面增温可能超过1.5 °C^[8], 黄、渤海的海冰很可能会受到显著的影响。但是对于未来黄、渤海海冰的变化特征, 至今还鲜有相关的研究。耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)预估了不同排放情景下, 未来全球气候的变化。本文拟将CMIP5的预估数据通过动力降尺度方法, 获得高时空分辨率的气象强迫场数据, 并驱动海冰—海洋耦合模式对未来黄、渤海的海冰进行预估。

2 模式与数据

对于海冰的回报和预估, 本文使用了国家海洋环境预报中心研发的多类冰—海洋耦合模式。其中海洋模式为三维Princeton Ocean Model (POM), 海冰模式为海冰热力—动力模式。该模式经过多年业务化运行与改进, 对黄、渤海海冰模拟与预报均具

收稿日期: 2015-10-27

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAC19B08)

作者简介: 祖子清(1985-), 男, 助理研究员, 博士, 从事海洋环流的可预报性研究。E-mail: zuzq@nmefc.gov.cn

有较高的能力。Liu等^[9]也利用该模式开展了13 a (1997—2009年)的连续回报实验,结果显示该模式对于黄、渤海的海冰具有较高的预报技巧。在本研究中,模式的设置与Liu等^[9]相同。模式的研究区域为 $[117.5^{\circ}\text{E}, 127^{\circ}\text{E}] \times [37^{\circ}\text{N}, 41^{\circ}\text{N}]$ (见图1中“R1+R2”),海冰模式和海洋模式的水平分辨率均为 $2' \times 2'$ ($3.7 \text{ km} \times 2.8 \text{ km}$),因此计算格点为 286×121 。海洋模式的积分时间步长外模为20 s,内模为10 min;海冰模式的积分时间步长为10 min。海冰模式与海洋模式同步耦合。耦合模式读入逐小时的气象强迫场,并线性插值为10 min间隔。海冰模式每隔10 min计算一次海面热通量,并传递给海洋模式。海冰和海洋模式每隔10 min分别计算应力项。海冰模式向海洋模式传递冰密集度和冰速,用于计算海洋模式的上表面热通量和应力;海洋模式向海冰模式传递第一层的海温和流速,用于计算海冰模式的海面热通量各项和冰-水界面的应力。

对于历史模拟实验,本文对NCEP-Reanalysis 2进行动力降尺度,获得了1978—2008年中国海高分辨率气象场数据。其中动力降尺度使用了MM5模式,该模式曾被广泛的用于动力降尺度研究,并显示了良好的性能^[10-12]。重构的气象场数据包含向下短波辐射、向下长波辐射、2 m处气温和湿度、10 m高风速、海平面气压和表面气压等变量。利用该气象数据强迫上述多类冰-海洋耦合模式,进行回报实验,获得了1978—2008年逐日冰类型、冰厚和冰密集度等数据。

对于未来情景下的气候预估,本文使用了CMIP5多个模式的预估数据。模式名称如表1所示,模式设置及其他相关信息请参考网站:<http://www-pcmdi.llnl.gov/>。CMIP5的预估情景包含不同的典型浓度路径(RCP):RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5,分别对应应在2100年达到的辐射强迫约为2.6、4.5、6.0和8.5 W/m^2 ,反应了不同的温室气体排放水平。渤、黄海的海冰与其上的2 m气温显示了较好的相关关系(见3.1节),因此对CMIP5数据集中每个模式每个情景的数据,本文逐一提取了黄、渤海范围内($[117.5^{\circ}\text{E}, 125.5^{\circ}\text{E}] \times [37^{\circ}\text{N}, 41^{\circ}\text{N}]$,图1中的“R1”)2 m气温的时间序列(2006—2045年),然后计算相对于2006—2014年,2015—2045年2 m气温的平均增量(见表1)。该温度增量被近似作为2015—2045年相对于1978—2008年的2 m气温增量,叠加在上述历史高分辨率气象强迫场上,以驱动海冰-海洋耦合模式,获得各模式各情景的海冰预估数据(见图2)。需要说明的是,将CMIP5数据中2015—2045年2 m气温相对于2006—2014年的增量,近似作为相对于历史情景数据(1978—2008年)的增量,其中必然引入误差。然而该误差显著的小于直接计算CMIP5数据中2015—2045年相对于历史回报数据2 m气温增量所引入的误差,因为后者引入了模式误差。

本文选用了4个变量作为衡量海冰变化的指标:1)结冰面积(ice area,单位: km^2),即结冰格点以面积为权重进行加权求和;2)结冰范围(ice extent,

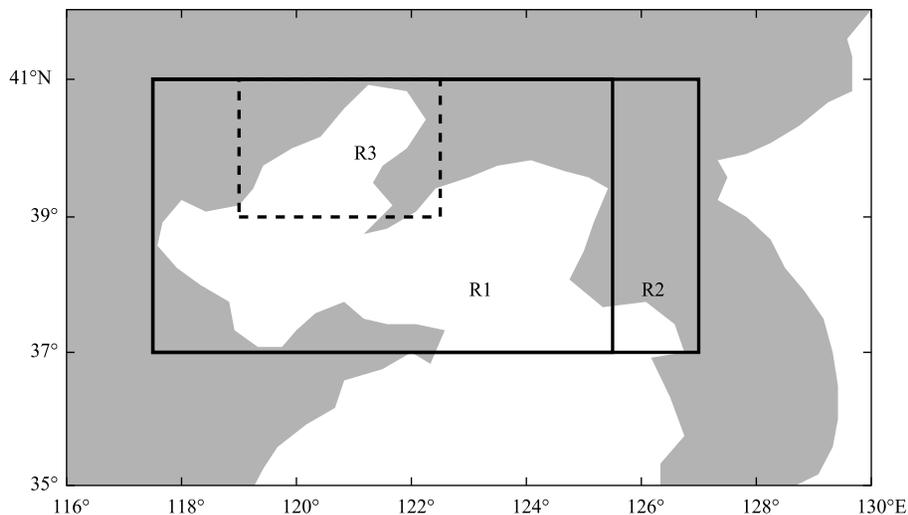


图1 本文的研究区域(“R1+R2”为模式积分区域,“R1”为渤海和黄海北部,“R3”为辽东湾)

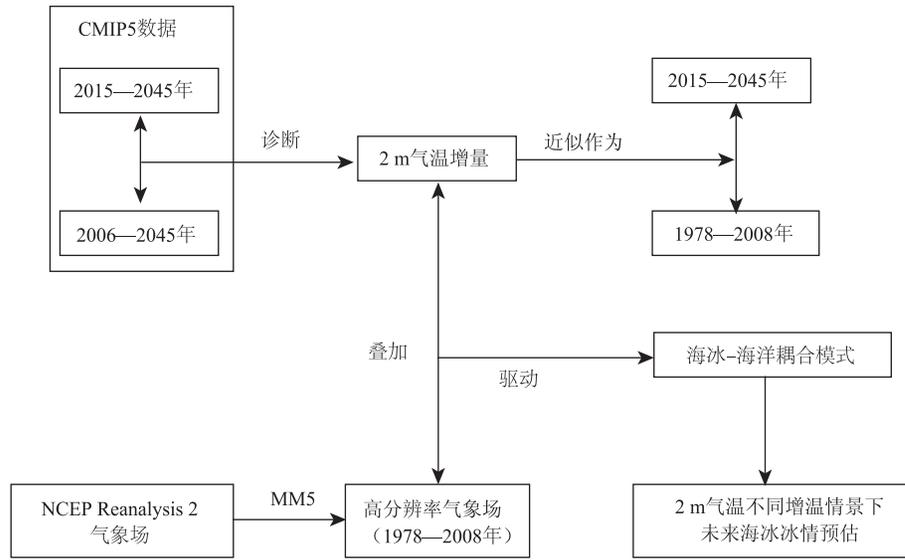


图2 未来海冰预估的流程图

单位:nmi),即从某个海湾湾底沿海湾中轴线到海冰外缘线的距离;3)持续天数(lasting days,单位:d),为从前年11月一次年3月,某海湾内存在海冰的天数;4)无冰年数(years without ice,单位:a),即研究时段内,持续天数为零(年内没有海冰生成)的年数。

3 未来海冰的变化特征

3.1 海冰对2 m气温增温的响应

如引言所述,黄、渤海的海冰受到多种气候因素的影响,而这些因素最终通过其上的大气或周围的海洋影响海冰。前人研究表明海冰受到其上大气的显著影响^[13]。本文首先检验了2 m气温对海冰生消过程的影响,以验证上述叠加2 m气温增量的有效性。如图3所示,辽东湾(如图1中“R3”所示)海冰的结冰范围与其上的2 m气温(坐标轴已上下翻转)呈现了基本反向的变化趋势。两者的相关系数达到-0.80(接近武晋雯等^[13]文中的-0.815),通过了99%的信度检验。其他海湾结果类似,此处不再给出。这说明2 m气温对海冰存在显著的影响,因此后文中将2 m气温增量作为未来气候变化的信号,加入到历史强迫场中,并依此进行未来海冰的预估研究,是合理的。

表1列出了各情景各模式中,相对于2006—

2014年,2015—2045年内2 m气温的平均增量。增温幅度为-0.4—1.7℃。平均而言,RCP2.6情景下,增温幅度最小,为0.57℃;RCP4.5情景下最大,为0.87℃;RCP6.0和RCP8.5增温幅度相近,分别为0.77℃和0.76℃。这说明随着温室气体排放的增大,黄、渤海的2 m气温并非单调增大,而是呈现了非线性的特征,比如最大增温对应中等排放水平的RCP4.5情景。

本文将表1所示的16个增温情景叠加到历史强迫场的2 m气温上,积分海冰-海洋耦合模式,得到了在不同增温幅度下海冰的变化情形(见图4)。总体而言,4个海湾的海冰随着2 m气温的增加,呈现单调减少的趋势。各海湾海冰增加和减少的最大速率分别对应2 m气温降低0.4℃和升高1.7℃的情形,因此海冰在未来情景下的变化范围也由这两种情形给出。相对于历史模拟,未来辽东湾海冰的变化最为显著,其结冰面积的变化区间为增加14%至衰减45%,结冰范围由增加7%至衰减27%,持续天数由延迟到75 d至缩短为57 d(历史情形为73 d);另外,在未来情景下,辽东湾每年均有海冰生成,因此无冰年数均为0,没有变化。渤海湾的结冰面积变化区间为增加25%至衰减64%,结冰范围为增加15%至衰减50%,持续天数由延长到29 d至缩短为12 d(历史情形为24 d),无冰年数由减少到4 a至增加为18 a(历史情形为6 a)。莱州湾结冰面积

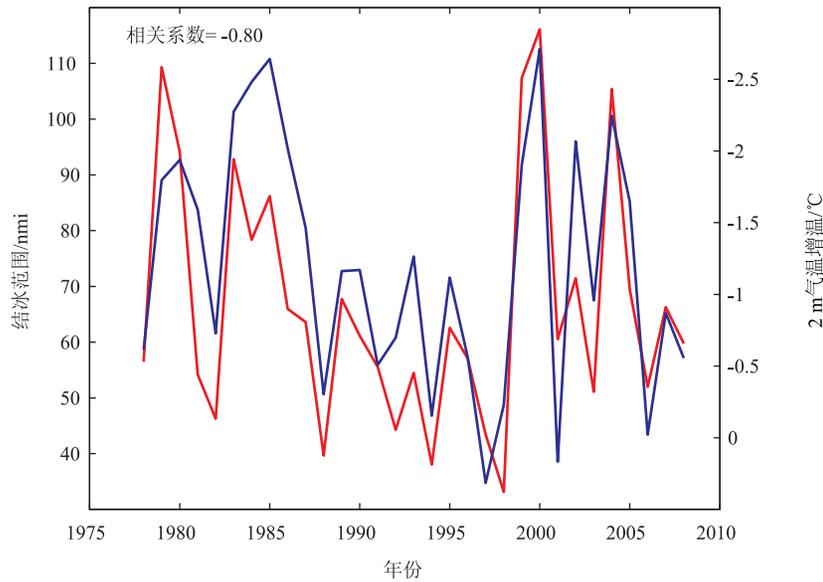


图3 1978—2008年辽东湾结冰范围(红线和左侧坐标轴)和2 m气温增温(蓝线和右侧坐标轴)

的变化范围为增加33%至衰减75%，结冰范围为增加22%至衰减63%，持续天数由延长到12 d至缩短为2 d(历史情形为9 d)，无冰年数为减少到16 a至增加为26 a(历史情形为19 a)。黄海北部海冰的变化特征与渤海湾类似，其结冰面积的变化范围由增加18%至衰减58%，结冰范围由增加18%至衰减46%，持续天数由延长到41 d至缩短为23 d(历史情形为38 d)，无冰年数由缩短为1 a至增加为7 a(历史情形为2 a)。就相对变化率而言，纬度越靠南的海湾受2 m气温增温的影响越强；而对于海冰自身的变化量而言，纬度越靠北的海湾海冰衰减的量值越大。

3.2 海冰对未来排放情景的响应

表1列出了各排放情景下，9个模式对未来30 a 2 m气温增量的预估结果。本研究将各个模式的结果分别叠加到1978—2008年的历史强迫场上，分别驱动海冰-海洋模式，给出各排放情景下海冰的预估结果。最后将同一排放情景下的9个海冰预估结果进行平均，作为该排放情景下未来海冰的预估结果。图5分别显示了历史情形(“HISTO”)、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5情景下，海冰的结冰面积、结冰范围、持续天数和无冰年数。总体而言，随着温室气体排放量的增多，海冰整体呈现减少的趋势，同时该趋势也呈现了一些复杂的特征。

对结冰面积而言(见图5a)，辽东湾海冰的量值

表1 2015—2045年与2006—2014年两个时段内渤海和黄海北部2 m气温的差值(研究区域为[117.5°E, 125.5°E]×[37°N, 41°N]，即图1中的“R1”，单位：°C)

模式名称	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
bcc-csm1-1	0.7	1.0		0.4
ccsm4	0.3	0.5		0.9
cnrm-cm5	0.3	0.5		0.9
gfdl		0.6	0.1	0.3
HadGEM2	1.0	0.9	0.9	0.9
ipsl	1.3	1.5	0.4	
miroc	1.2	1.3	1.7	1.1
mri-cgcm3	-0.4	1.0		1.0
ec-earth	0.2	0.5		0.6
Average	0.57	0.87	0.77	0.76

减少最为显著。相对于历史情形，各排放情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5)依次减少17%、26%、22%和23%。但是莱州湾海冰的相对变率最为显著，各排放情景下依次为30%、47%、40%和43%。一个有意思的现象是，黄、渤海的海冰并非排放越多，减少越多，而是在RCP4.5情景下达到最小值，之后随着排放的增多，海冰反而增加。实际上，通过诊断2 m气温增温可以发现，RCP4.5下增温最多(0.87°C)，这导致了该情景下海冰衰减较多，而RCP8.5和RCP6.0相对于RCP4.5增温减小，所以海冰也随之增加。

表2 渤海和黄海北部海冰的总体变化特征

	结冰面积/km ²		结冰范围/nmi		持续天数/d		无冰年数/a	
	历史	未来	历史	未来	历史	未来	历史	未来
辽东湾	1 994	1 556	67	58	73	66	0	0
渤海湾	376	255	27	20	24	19	6	11
莱州湾	57	34	7	5	9	6	19	24
黄海北部	301	217	34	27	38	33	2	3

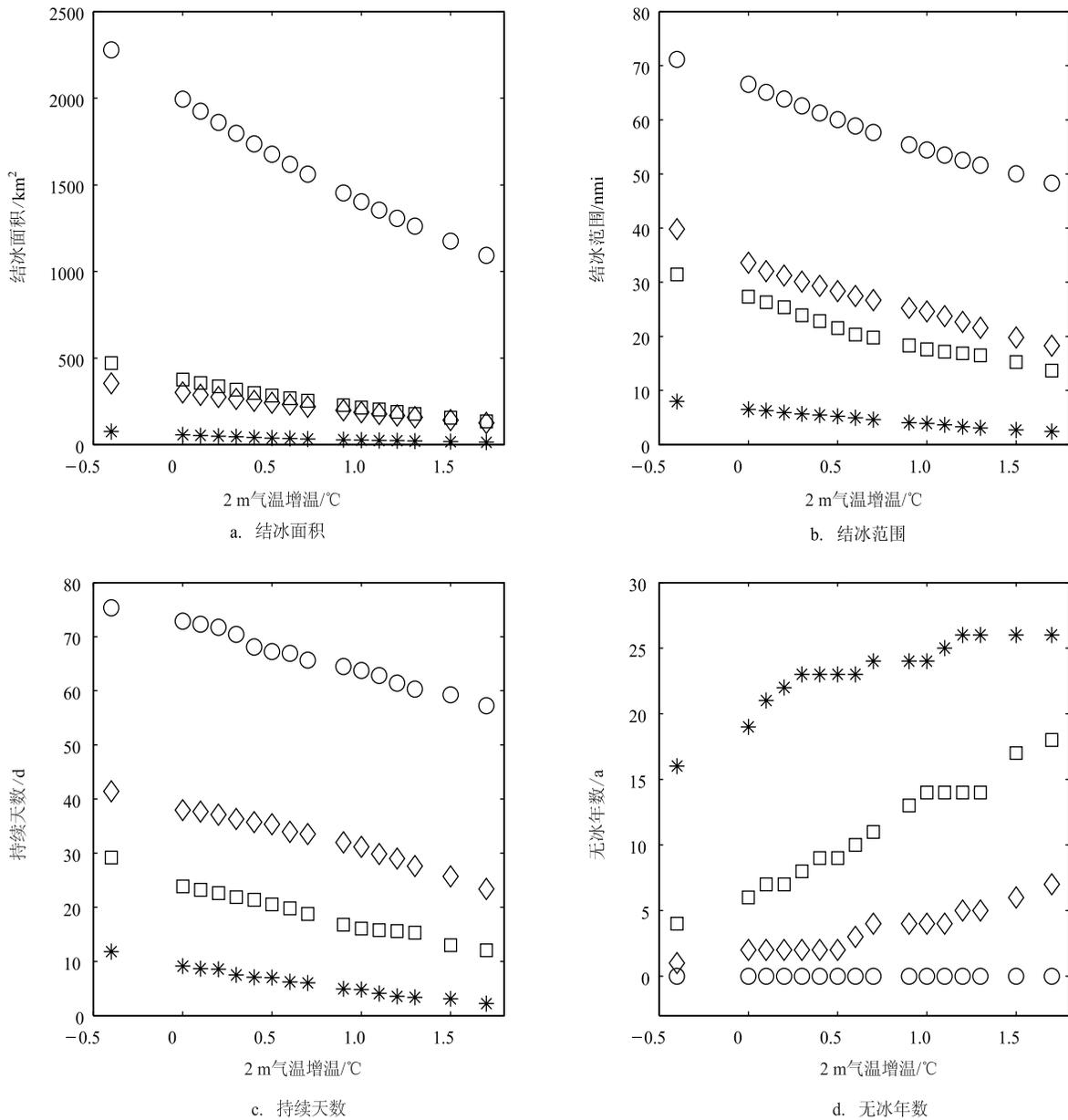


图4 2015—2045年海冰指标随2 m气温增温的变化

(○ 辽东湾 □ 渤海湾 * 莱州湾 ◇ 黄海北部)

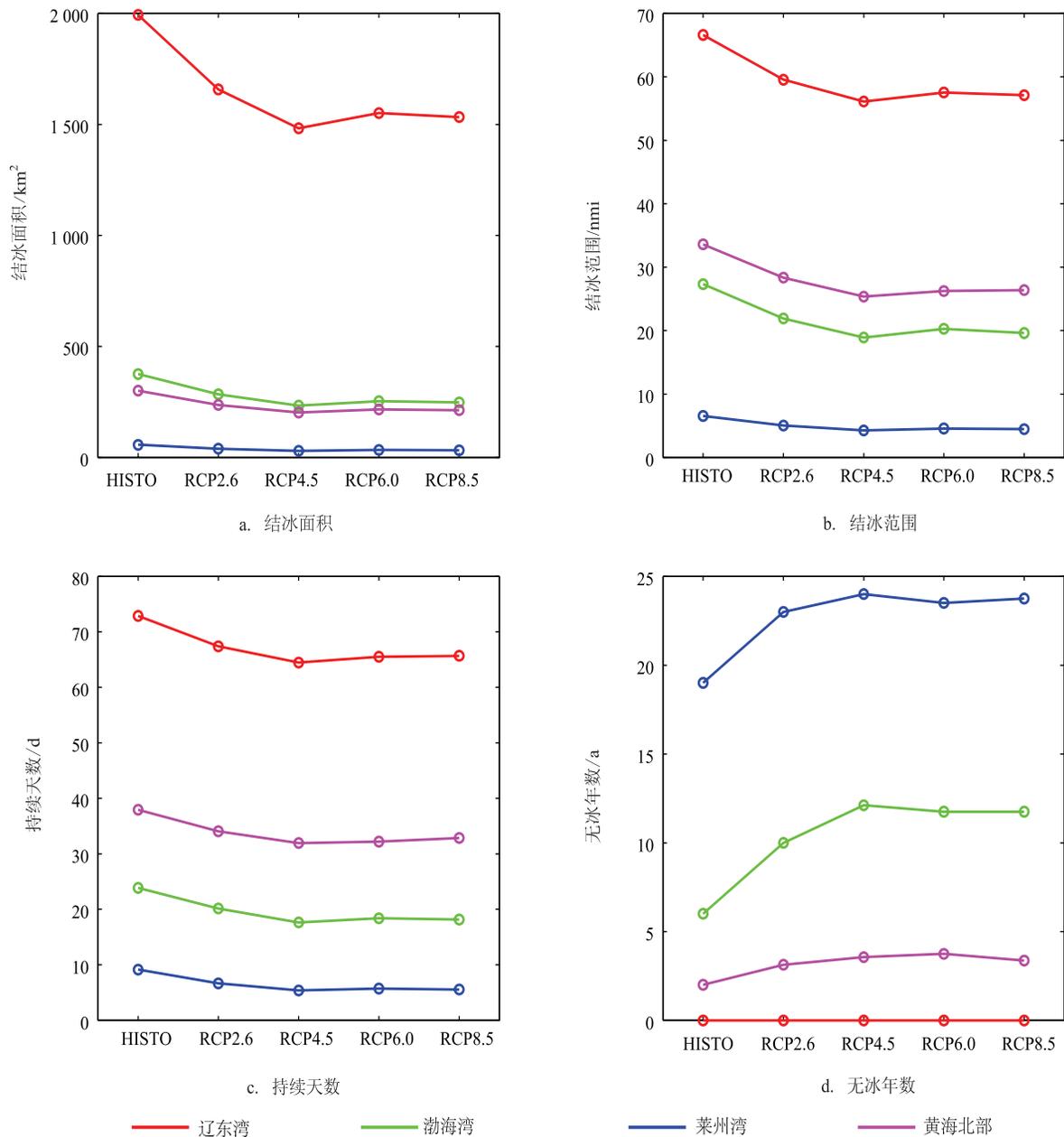


图5 2015—2045年历史情形及4种排放情景下的海冰指标

结冰范围呈现了类似的结果(见图5b)。相对于历史情景,辽东湾的结冰范围在各排放情景下,依次减少11%、16%、14%和14%。莱州湾结冰范围的相对变化率依然最为明显,各情景下依次减少23%、35%、30%和32%。同样,4个海湾的结冰范围在RCP4.5情景下衰减最多,之后随着排放的增多,2 m气温增温减小,海冰也随之增加。

对持续天数而言(见图5c),辽东湾的变化最为

显著:历史情形下为73 d,在各排放情景下依次缩短为67 d、64 d、66 d和66 d。其他3个海湾的持续天数平均缩短4—5 d。同样,各海湾的持续天数在RCP4.5情景下最短,RCP6.0和RCP8.5次之,RCP2.6下最长。

在各情景下,辽东湾的无冰年份没有变化,均为0,说明各情景下辽东湾每年均有海冰生成(见图5d)。渤海湾的无冰年份由历史情形下的6 a,在各

排放情景下分别增加为10 a、12 a、12 a和12 a;莱州湾由19 a,在各情景下分别增加为23 a、24 a、24 a和24 a;黄海北部在各情景下由2 a分别增加为3 a、4 a、4 a和3 a。其中莱州湾和渤海湾的无冰年数在RCP4.5下最多,而黄海北部在RCP6.0下最多。

最后本文将各排放情景下的海冰指标进行等权重平均,得到对未来31 a海冰变化的预估,结果如表2所示。相对于历史情形(1978—2008年),辽东湾、渤海湾、莱州湾和黄海北部未来的结冰面积将依次减少438 km²、121 km²、23 km²和84 km²;结冰范围将依次减少9 nmi、7 nmi、2 nmi和7 nmi;持续天数将依次减少7 d、5 d、3 d和5 d;无冰年数将依次增加0 a、5 a、5 a和1 a。就整个黄、渤海而言,相对于历史情形,未来的结冰面积由2 728 km²减少至2 062 km²,衰减24%;结冰范围由135 nmi减少至110 nmi,衰减19%;持续天数由73 d缩短至66 d,缩短10%(由辽东湾的海冰决定)。

4 结论

本文诊断了CMIP5数据集中黄、渤海区域内2 m气温的增量,然后将其叠加在1978—2008年的气象场上驱动海冰-海洋耦合模式,对2015—2045年内黄、渤海的海冰变化特征进行了预估。首先本文检验了2 m气温与辽东湾海冰的相关性,结果显示两者存在较高的相关性,其相关系数为-0.80。这说明2 m气温对海冰的生消过程存在重要的影响。因此将2 m气温增量作为未来气候变化的信号,加入历史强迫场驱动模式进行海冰的未来情景预估,是合理的。随着2 m气温增温的升高,黄、渤海4个海湾的海冰均呈现单调减少的趋势,且变化的范围也较为显著。具体而言,辽东湾、渤海湾、莱州湾和黄海北部海冰结冰面积的变化范围分别为-45%—14%,-64%—25%,-75%—33%和-58%—18%(负值和正值分别对应衰减和增加的百分比)。就相对变化率而言,纬度越靠南的海湾受2 m气温增温的影响越显著;而纬度越靠北的海湾海冰衰减的量值越大。

在4种排放情景下,辽东湾、渤海湾、莱州湾和黄海北部4个海湾的海冰均呈现减少的趋势。但随着排放的增多,4个海湾的海冰并非单调的减少,而

是RCP4.5下衰减最强,RCP6.0和RCP8.5次之,RCP2.6最弱。这可归因于黄、渤海2 m气温增温对排放增加的非线性响应。对4种情景进行平均,可以发现在未来31 a内,4个海湾结冰面积将依次减少438 km²、121 km²、23 km²和84 km²;结冰范围将依次减少9 nmi、7 nmi、2 nmi和7 nmi;持续天数将依次缩短7 d、5 d、3 d和5 d。最后就整个黄、渤海而言,未来31 a内结冰面积将减少24%,结冰范围将减少19%,持续天数将缩短10%。

本文利用对海冰影响较为显著的因子,2 m气温,做了海冰预估的有益的尝试。但对其它热动力因素的影响,尚未深入研究。在下一步工作中,可考虑利用CMIP5的试验数据进行动力降尺度,直接驱动区域大气-海冰模式,对未来的海冰冰情进行预估。

参考文献:

- [1] 宋升锋,王建勇,王珍珍,等. 2010/2011年冬季渤海海冰特征分析[J]. 海洋预报, 2011, 28(6): 60-63.
- [2] 刘钦政,黄嘉佑,白珊,等. 渤海冬季海冰气候变异的成因分析[J]. 海洋学报, 2004, 26(2): 11-19.
- [3] 唐茂宁,洪洁莉,刘煜,等. 气候因子对渤海冰情影响的统计分析[J]. 海洋通报, 2015, 34(2): 152-157.
- [4] 李春花,刘钦政,黄焕卿. 渤海、北黄海冰情与太平洋副热带高压的统计关系[J]. 海洋通报, 2009, 28(5): 43-47.
- [5] 唐茂宁,刘煜,李宝辉,等. 渤海及黄海北部冰情长期变化趋势分析[J]. 海洋预报, 2012, 29(2): 45-49.
- [6] 李剑,黄嘉佑,刘钦政. 黄、渤海海冰长期变化特征分析[J]. 海洋预报, 2005, 22(2): 22-32.
- [7] 刘煜,刘钦政,隋俊鹏,等. 渤、黄海冬季海冰对大气环流及气候变化的响应[J]. 海洋学报, 2013, 35(3): 18-27.
- [8] IPCC. 政府间气候变化专门委员会第五次评估报告: 第一工作组报告大纲—气候变化2013: 自然科学基础[R]. 剑桥, 纽约: 剑桥大学出版社, 2013: 1-27.
- [9] Liu Y, Liu Q Z, Su J, et al. Seasonal simulations of a coupled ice-ocean model in the Bohai Sea and North Yellow Sea since the winter of 1997/1998[C]//Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui, Hawaii: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2011: 942-947.
- [10] 李艳,汤剑平,王元,等. 区域风能资源评价分析的动力降尺度研究[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(2): 192-200.
- [11] 彭世球,刘段灵,孙照渤,等. 区域海气耦合模式研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(9): 1301-1316.
- [12] Jang S, Kawas M L. Downscaling global climate simulations to regional scales: statistical downscaling versus dynamical

downscaling[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 20(1): A4014006, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000939.

[13] 武晋雯, 张玉书, 冯锐, 等. 基于MODIS的海冰面积遥感监测及其与气温的相关分析[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(1): 73-76.

Future projection of the sea ice in the Bohai Sea and the North Yellow Sea

ZU Zi-qing, LING Tie-jun, ZHANG Yun-fei, LIU Yu, TANG Mao-ning

(Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China)

Abstract: The future projection of sea ice in the Bohai Sea and the North Yellow Sea is studied. The increment of air temperature at two meters during 2015—2045 in CMIP5 data set, with respect to the historical case (1978—2008), was diagnosed, and superimposed on the historical climatology to force the sea ice-ocean coupled model to yield the projection of future sea ice. The results show that under different Representation Concentration Pathways (RCPs), the future sea ice in the four bays all decrease. However, the future sea ice will not decrease monotonously as the emission of greenhouse gas increases, i.e., RCP4.5 corresponds to the strongest decrease, RCP6.0 and RCP8.5 weaker, and RCP2.6 the weakest. For the mean over four RCPs, the ice areas in the four bays (Liaodong, Bohai, Laizhou and North Yellow Sea) decrease by 438, 121, 23 and 84 km², respectively; the ice extents decrease by 9, 7, 2 and 7 nmi(sea mile, 1 nmi=1.852 km), respectively. For the Bohai Sea and North Yellow Sea, the future sea ice will decrease by 24% (ice area), 19% (ice extent) and 10% (lasting days).

Key words: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5); Bohai Sea and North Yellow Sea; future projection of seaice; air temperature at 2 meters