

李娟,左军成,谭伟,等. 21 世纪格陵兰冰川融化速率对海平面变化的影响[J]. 海洋学报,2015,37(7): 22—32,doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.07.003

Li Juan,Zuo Juncheng,Tan Wei,et al. The influence of the melting rate of the Greenland ice sheet on the sea level variation for 21st century[J]. Haiyang Xuebao,2015,37(7): 22—32,doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.07.003

21 世纪格陵兰冰川融化速率对海平面变化的影响

李娟^{1,2*},左军成²,谭伟²,陈美香²,赵雪¹

(1. 国家海洋局 南海预报中心,广东 广州 510300;2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘要: 本文利用大洋环流模式 POP 研究 RCP4.5 情景下 21 世纪格陵兰冰川不同的融化速率对全球及区域海平面变化的影响。结果显示:当格陵兰冰川的融化速率以每年 1% 增加时,全球大部分海域的动力和比容海平面变化基本不变,主要是由于格陵兰冰川在低速融化时并不会导致大西洋经向翻转流减弱。当格陵兰冰川的融化速率以每年 3% 和每年 7% 增加时,动力海平面在北大西洋副极地、大西洋热带、南大西洋副热带和北冰洋海域呈现出显著的上升趋势,这是因为格陵兰冰川快速融化导致大量的淡水输入附近海域,造成该上层海洋层化加强和深对流减弱,导致大西洋经向翻转流显著减弱;与此同时,热比容海平面在北冰洋、格陵兰岛南部海域和大西洋副热带海域显著下降,而在热带大西洋和湾流海域明显上升;此时盐比容海平面的变化与热比容海平面是反相的,这是由于大量的低温低盐水的输入,造成北大西洋副极地海域变冷变淡、大西洋经向翻转流和热盐环流显著减弱,引起了太平洋向北冰洋的热通量和淡水通量减少,导致了北冰洋海水变冷变淡,同时热带大西洋滞留了更多的高温高盐水,随着湾流被带到北大西洋,北大西洋副极地海域低温低盐的海水,被风生环流输运到副热带海域。

关键词: 海平面变化;21 世纪;格陵兰冰川;RCP4.5;经向翻转流

中图分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2015)07-0022-11

1 引言

由于温室气体引起的全球变暖,格陵兰冰川质量减少的速率从 20 世纪 90 年代中期开始加速,在不到 10 年的时间里就增加了 1 倍^[1],到 21 世纪初格陵兰冰川质量的减少速率可能已达到了历史最大值约为 300 Gt/a^[2-4]。模式结果显示,如果温室气体的浓度保持在 $1\,000 \times 10^{-6}$,格陵兰冰川将会在 3 000 年内全部融化^[5],而冰川在第一个千年就会大部分融化,可使海平面上升 3 m 以上,这就意味着巨大的淡水将流入北大西洋,将会显著影响北大西洋的经向翻转流。气候变暖对于海洋和陆地冰的贡献已经包含了区域

影响,其形式有海洋动力导致的区域海水密度的变化和因陆地冰川融化导致的海水质量的重新分布^[6]。陆地冰川融化导致的淡水径流和冰盖的崩裂,能引起海平面的变化并会潜在的影响海洋的热盐环流,热盐环流的变化也会影响到海平面的变化^[2,7]。目前一些模式结果显示:如果气候继续变暖将会导致冰川快速融化,大量淡水输入大洋,进而引起经向翻转流急剧减弱^[8-10]。

格陵兰冰川逐渐减小,导致海水质量逐年增加,从而影响全球及区域海平面变化。在 21 世纪,格陵兰和南极冰川融化可能是对全球海平面变化贡献最大的因子^[11]。Gregory 和 Oerlemans^[12] 预估高山冰源

收稿日期:2014-07-18;修订日期:2015-03-19。

基金项目:国家自然科学基金(41276018);海洋公益性项目(201005019);海洋公益性项目(201305020-8)。

作者简介:李娟(1982—),女,山东省菏泽市人,博士,从事气候与海平面变化和潮汐动力学研究。E-mail:twlj0419@126.com

和格陵兰冰盖的融化对海平面变化的贡献在 21 世纪大约为 20 cm。就目前的研究进展来看,诸如冰川面积、高度以及形状特征和质量平衡等都有待更好地了解 and 深入研究。

陆地冰融化将会导致大量的淡水输入到北大西洋,进而引起大西洋经向翻转流的减弱^[13-14]。大西洋经向翻转流(或者热盐环流)是全球大尺度海洋环流,把海洋上层暖而咸的水带到北大西洋副极地海域,在那里失热下沉,然后向南流到世界大洋的其他海域上升^[15]。

对于未来气候变化,利用模式研究陆地冰融化到目前为止,大多数的研究焦点放在了格陵兰冰川的融冰水流入了北大西洋发生深层对流的海域。IPCC 第四次评估报告指出,目前的耦合模式中没有包含陆地冰模块,主要的假设是未来气候变暖会产生一个比较稳定的层结海洋^[16-17]。近年来的模式结果显示,如果把格陵兰冰川融化的融冰水理想的加入到模式模拟中去,如果格陵兰冰川的融冰水足够多,大西洋的经向翻转流将会减弱^[11,18-19]。区域海平面偏离全球平均海平面因为动力海平面和静力平衡海平面结构的综合影响,动力海平面主要受海洋、大气环流和温度、盐度的重新分配的影响;静力平衡海平面结构受重力、弹力和质量重新分配旋转效应的影响。在目前格陵兰冰盖的融化速率下,局域海平面的变化主要受动力海平面变化的影响;更高格陵兰冰川融化速率下,动力海平面趋势在西北大西洋最强,当融化冰相当于 20 cm 等价海平面时,静力平衡效应占主导^[20]。

IPCC 为第五次报告开发了 4 种以稳定性浓度为特征的新情景,它们分别为 RCP8.5、RCP6、RCP4.5 和 RCP2.6。本文选择的是中等排放情景 RCP4.5。RCP4.5 情景下,2100 年预计升温 2.4~5.5℃,2100 年后辐射强度稳定在 4.5 W/m²,大气温室气体浓度稳定在 526×10⁻⁶ CO₂ 当量,是一个比较稳定的情景。本文关注的焦点是格陵兰冰川不同的融化速率是如何通过影响大西洋经向翻转流来影响全球及区域海平面变化。在 CMIP5 模式结果的基础上,本文利用三维海洋环流 POP 模式模拟 RCP4.5 情景下 21 世纪格陵兰冰川不同的融化速率对全球及区域海平面变化的影响。

2 模式和数值试验介绍

2.1 模式介绍

海洋环流模式 POP 是美国 Los Alamos 国家实

验室受能源部 CHAMMP 计划资助开发的由早期的 Bryan, Cox, Semtner 和 Chervin 模型发展而来的一个三维海洋环流模式,2001 年 POP 被 NCAR 的共同气候系统模式 CCSM(Community Climate System Model)采用,作为其中的海洋模式。POP 模式采用的坐标系为球坐标系,垂直方向采用 z 坐标,模型控制方程采用了静压近似和 Boussinesq 近似。海表面采用的是自由表面边界条件,该条件认为海气交界面可以自由发展,这就使得海表面高度成为可以预测的变量。

本文所使用的网格与 CCSM4.0 中海洋模式的网格是一致的,该网格在沿经度的方向上有 320 个格点,在沿纬度方向上有 384 个点,南边界在 82°S 的位置封闭,北边界大约在 80°N 的位置封闭,网格的分辨率沿纬度的方向约为 (1/2)°、沿经度的方向大约为 1°。从海表到深度为 5 500 m 的底层,垂直方向上共分为 40 层,最上层的间隔大约 5 m,然后逐渐加大过渡到了深层的 250 m 左右。

2.2 数值试验

本文首先模拟 20 世纪的全球水文场作为 21 世纪模拟的初始场,模式的初始温盐场是 CCSM4.0 模拟的 1850—1870 年的气候态月均数据,模式运行 200 年稳定后开始输入逐月的变强迫场,模式从 1850 年运行到 2005 年。

本文设置了 4 组试验,所有试验均开始于模式在 2005 年 12 月的 restart 场。试验 1 是控制试验(control exp),即没有考虑格陵兰冰川融化的影响;试验 2~4 是敏感性试验,即考虑了格陵兰冰川不同的融化速率对全球及区域的海平面变化的影响。在敏感性试验 2~4 中,假设格陵兰冰川融化只在北半球的夏半年融化,且融冰水全部均匀地流进格陵兰岛南部的附近海域(58°~72°N, 12°~60°W, 见图 1),其中冰川融化的影响是以等效盐通量的形式加入到模式试验中的。格陵兰冰川最初的平均融化速率为 0.01 Sv (1 Sv=10⁶ m³/s,或者是 1 mm/a 全球等效海平面),这个融化速度与目前观测到的比较接近^[2-3]。在敏感性试验 2~4 中,假设格陵兰冰川融化在最初融化速率的基础上增长率分别为每年 1%(1%exp)、3%(3%exp)和 7%(7%exp),其中每年 1%、3%的增长速率持续到 2100 年,每年 7%试验中持续到 2055 年,然后保持不变到 2100 年。到 2100 年时,增长速率为 1%的试验格陵兰冰川的融化速率为 0.03 Sv,增长速率为每年 3%的试验中为 0.19 Sv,每年 7%试验为

0.29 Sv, 其中每年 7% 试验比较接近过去 10 年观测得到的格陵兰冰川质量减少的增长率^[2,4]。

本文所进行的数值试验采用的表面强迫包括表面淡水通量、表面热通量和表面风应力场, 强迫场均

来自 CMIP5 中 CCSM4 在 RCP4.5 情景下的模式结果。热通量、淡水通量和风应力等强迫场是逐时的月均场。本文设置的 4 组试验, 控制试验 1 作为敏感性试验的参考。

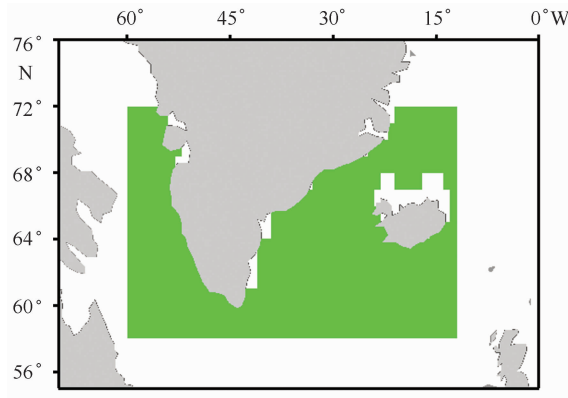


图 1 21 世纪格陵兰冰川融化的融冰水流入的海域

Fig. 1 The sea area of the input Greenland ice sheet melting water during the 21st century

3 21 世纪格陵兰冰川融化对区域动力海平面变化的影响

海平面变化直接反映三维大尺度海洋环流变化。动力海平面可简单地通过水平流速和海平面梯度(或水平压力梯度)之间的地转平衡关系反映出来, 流动沿海平面等值线方向。区域海平面不仅受比容效应的影响, 还会受到海洋动力的影响, 即海平面变化还会受区域外海洋环流的控制。经向翻转流和风生环流的变化引起局地海水堆积, 从而导致局地海平面变化, 而对全球而言, 平均动力海平面是个常数。

21 世纪动海平面上升最快的海域位于南大洋的 43°S 纬度带海域, 最大可达 35 cm(见图 2), 而与其相邻的南极绕极流海域动海平面急剧下降, 最大可为 -50 cm, 这与南大洋高纬度海域的海平面下降造成整个南大洋海面梯度增大和南极绕极流输运增强有关。北冰洋大部分海域、北大西洋的副极地环流海域、北太平洋北赤道流和副热带环流的西侧海域动海平面上升的比较快约为 10~20 cm, 这与大部分的模拟结果相似^[21], 与该海域气温上升幅度大及淡水输入有关。北大西洋副热带中心海域、南半球的副热带海域和北太平洋副极地海域动海平面存在不同程度的下降, 下降的幅度为 1~20 cm(见图 2), 与 Yin 等^[22]结果一致, 这可能是由于该海域 Sverdrup 输运增强引起

的动力海平面下降。

研究表明, 密度大的深层水在北大西洋生成, 它是经向翻转流的一部分, 因此, 北大西洋的动力海平面相对于北太平洋是较低的^[23]。一般情况下, 当北大西洋深层水的生成减弱时, 北大西洋的动力海平面比其他海域上升的快^[28]。格陵兰冰川不同的融化速率会影响大西洋经向翻转流的变化(见图 3), 当格陵兰冰川的融化速率比较低时, 经向翻转流不会减弱(见图 3a), 随着格陵兰冰川融化速率的增大, 大西洋经向翻转流显著减弱, 特别是 20°N 以北 1 500 m 以浅的海域, 最大可减弱 0.5 Sv(见图 3b), 这与 Hu 等^[11]的研究结果一致。

当大西洋经向翻转流明显减弱时, 动力海平面在北冰洋、北大西洋副极地、热带大西洋和南大西洋副热带海域显著上升, 而在印度洋、太平洋和南大西洋海域则是下降的(见图 4)。当格陵兰冰川以每年 1% 的加速度融化时, 只有北大西洋副极地海域动海平面呈现出微弱的上升趋势(见图 4a), 这是由于冰川的融化速度较低时大西洋经向翻转流几乎不会减弱(见图 3a)。随着格陵兰冰川融化速率的增大, 动力海平面在北大西洋副极地环流海域、大西洋热带、南大西洋副热带和北冰洋呈现出较快的上升趋势(见图 4b、c), 到 21 世纪末, 格陵兰岛南部海域和北美沿岸动海平面最大可上升 5 cm(见图 4c); 在欧洲沿岸、北大西洋

副热带、太平洋、印度洋和南大洋呈现出不同程度的下降(见图 5b、c),这是由于经向翻转流在 3%exp 和

7%exp 试验中显著地减弱导致了湾流和北大西洋暖流减弱、拉布拉多寒流加强(见图 3)。

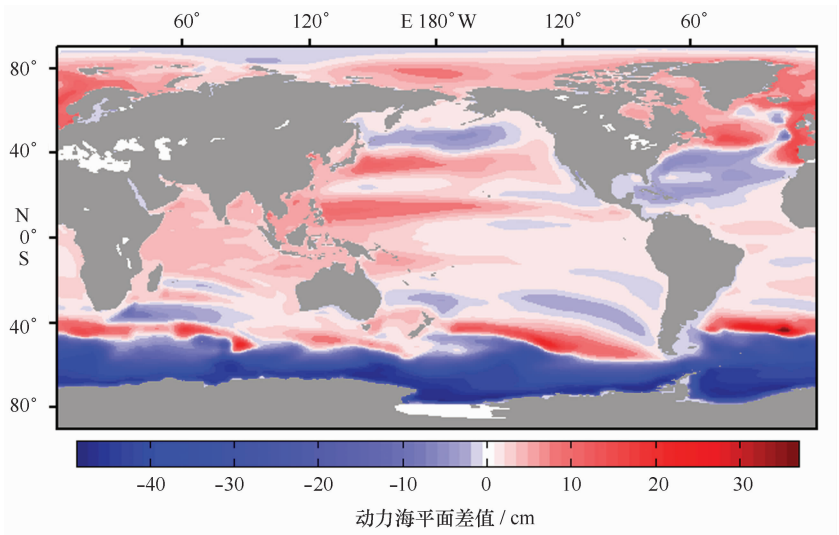


图 2 2081—2100 年平均动力海平面和 1981—2000 年平均动力海平面的差值
Fig. 2 Dynamic sea level anomalies in the late 21st century relative to that in the late 20th century

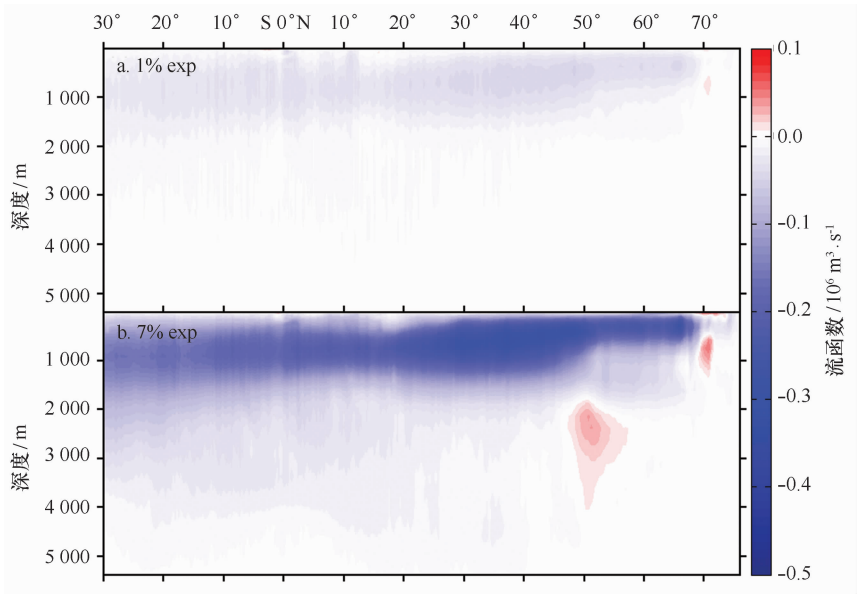


图 3 敏感性试验 2081—2100 年大西洋经向流函数与控制试验的差值
Fig. 3 Mean Atlantic meridional streamfunction anomaly between the 1%exp (a), the 7%exp (b) and the contralexp at the end of 2081 to 2100

4 格陵兰冰川融化对全球平均比容海平面的影响

大气中温室气体浓度的增加和格陵兰冰川融化显著影响全球和区域海平面变化。温室气体浓度的

增加会导致海洋吸收较多的热量,海洋中热量的增加将会引起海水体积的增加,继而影响热比容海平面的上升。陆地冰融化、降水和径流等还会引起海水的盐度产生变化,这会导致盐比容海平面的变化^[19]。

21 世纪全球平均比容海平面上升主要是由于热

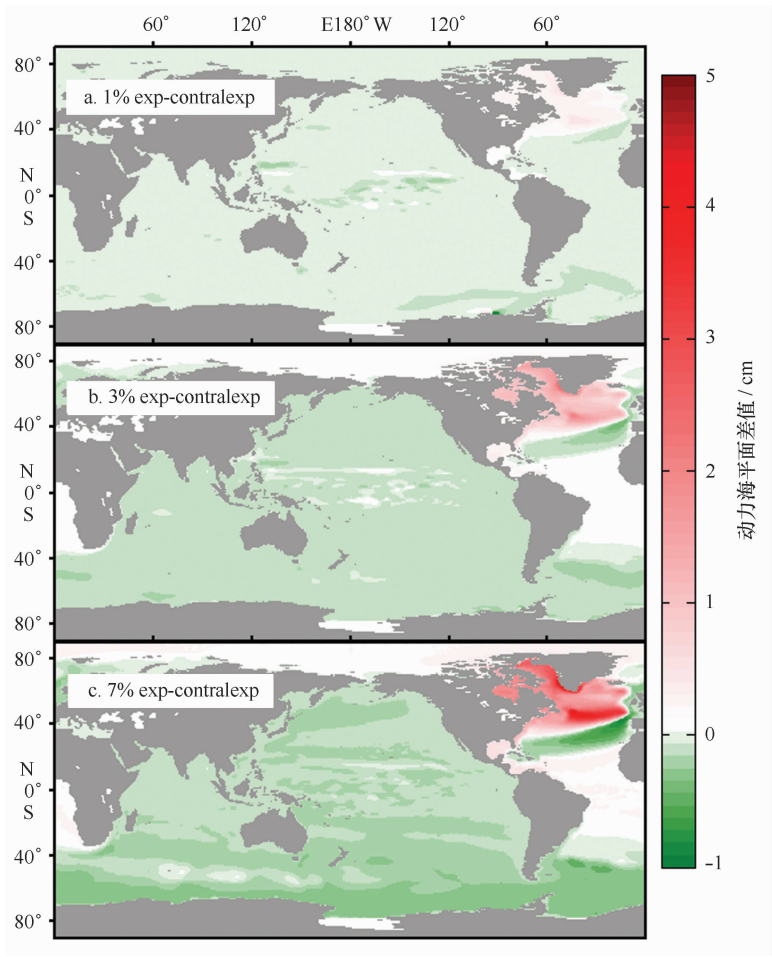


图 4 2081—2100 年平均动力海平面与控制试验的差值
Fig. 4 Dynamic sea level anomalies relative to that in the contralex test of 2081 to 2100

比容效应,盐比容对比容海平面上升的贡献相对比较小,这主要是由于海冰的融化、蒸发降水或者是海洋中盐度的重新分布。敏感性试验中的比容海平面变化在 21 世纪与控制试验相似,在 21 世纪的前半个世纪,敏感性试验和控制试验的全球平均比容海平面几乎是重合的(见图 5),在 21 世纪中后期敏感性试验中的全球平均比容海平面变化相对于控制试验中的比容海平面有所上升,在 21 世纪末上升最大可达 0.6 cm(见图 5)。

5 格陵兰冰川融化对全球及区域比容海平面变化的影响

格陵兰冰川融化产生的大量低温低盐水流入北大西洋,会导致经向翻转流的强度显著减弱^[13-14]。格陵兰冰川融化会使北大西洋副极地海域的表层变冷和变淡,加上该海域的海水热量不断向大气散热,

因而密度变大,接着密度变大的海水下沉到深层,向南流动,在大洋的其他海域上升。大量的模式结果显示,经向翻转流的显著减弱会引起北大西洋和附近海域变冷^[11,14,24],也会影响该海域的热比容和盐比容海平面的变化。

相对于 20 世纪的热比容海平面,21 世纪热比容海平面在全球大部分海域呈现出显著的上升趋势,尤其是在 20°N 以南的大西洋比同纬度的太平洋上升的快(见图 6),这是由于该海域 2 000 m 以浅的温度在大西洋比太平洋增加的快^[11]。热比容海平面在北大西洋的 20°~40°N 海域呈现出显著的下降趋势(见图 6),这是因为虽然该海域的表层温度是上升的,但是在深度为 500~2000 m 处急剧下降,最大下降了 2.5℃^[11]。热比容海平面在南大洋表现出微弱的下降,这是由于虽然该海域表层是升温的,而在 500 m 以深是降温的^[11]。

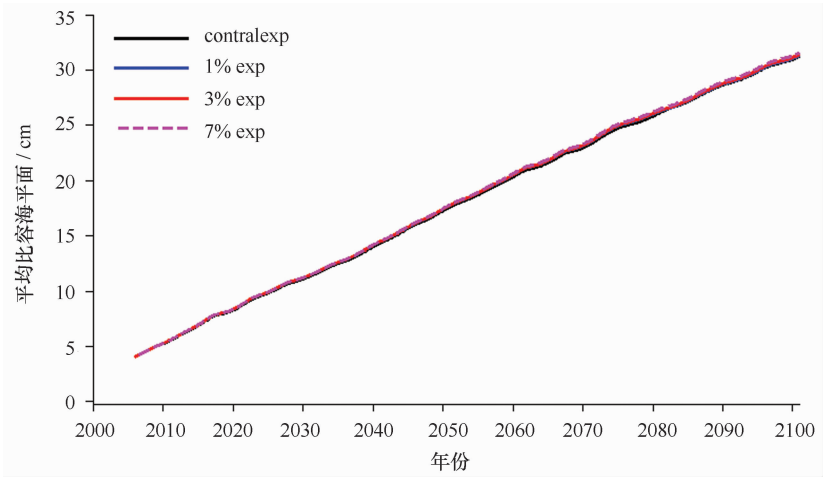


图 5 2000—2100 年全球平均比容海平面变化

Fig. 5 Global mean steric sea level change of 2000 to 2100

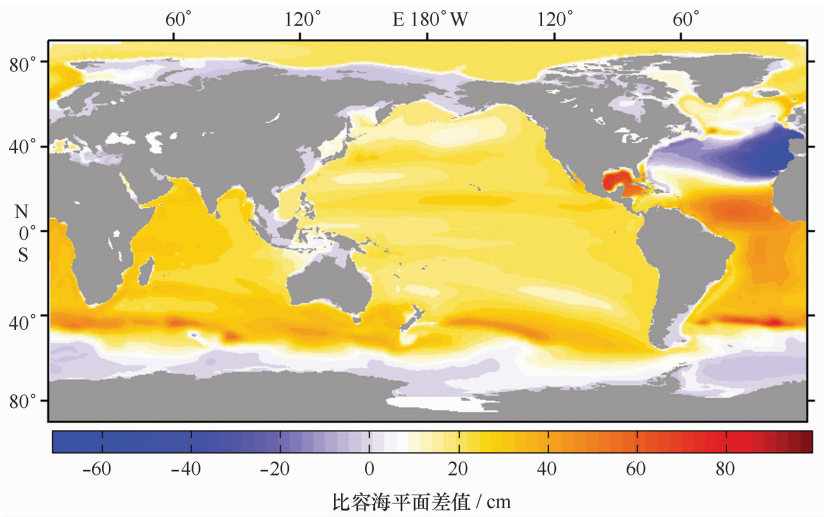


图 6 控制试验 2081—2100 年平均热比容海平面与 1981—2000 年的差值

Fig. 6 Thermosteric sea level anomalies in 2081 to 2100 relative to that in 1981 to 2000

格陵兰冰川不同的融化速率对热比容海平面变化的影响存在显著的差异(见图 7)。当格陵兰冰川的融化速率较小时,全球大部分海域的热比容海平面相对于控制试验来说变化不大,受影响的海域主要位于热带大西洋和北大西洋(见图 7a),随着格陵兰冰川融化速率的增大,热比容海平面在北冰洋、格陵兰岛南部海域和大西洋副热带海域表现出显著的下降,在欧洲北部沿岸和格陵兰岛南部海域下降的最快,最大可达 -2 cm ,这是由于当格陵兰岛冰川的融化速率比较大时,大量的低温低盐水输入到格陵兰南部海域,引起北大西洋副极地海域的深对流减弱,导致大西洋经向翻转流和热盐环流减弱(见图 3),进而导致太平

洋向北冰洋的热通量输送减少,北冰洋海水变冷^[11];大西洋 45°N 附近海域热比容海平面显著上升,主要是受湾流的影响,大量的格陵兰冰川融冰水输入到格陵兰岛南部海域导致了向北的热盐环流减弱,从而使热带大西洋滞留了更多的热量,随着湾流被带到北大西洋,引起了北大西洋 45°N 附近海域的次表层变暖(见图 8)。北大西洋副极地海域的热比容海平面显著下降的原因主要是由于经向翻转流的减弱导致了流向该海域的热输送减少(见图 8);北大西洋副热带海域的热比容海平面显著下降主要是由于副极地的冷水被风生环流输运到副热带海域(见图 8)。

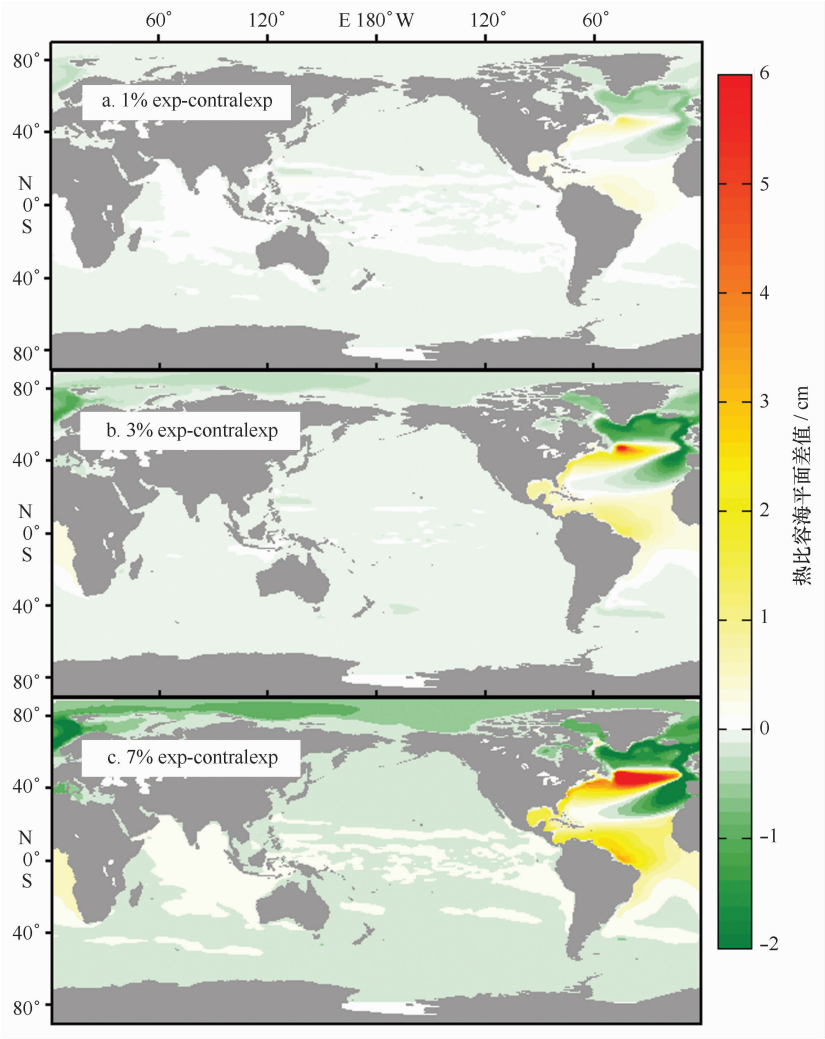


图 7 2081—2100 年平均热比容海平面与 1981—2000 年的差

Fig. 7 Thermosteric sea level anomalies in 2081 to 2100 relative to that in 1981 to 2000

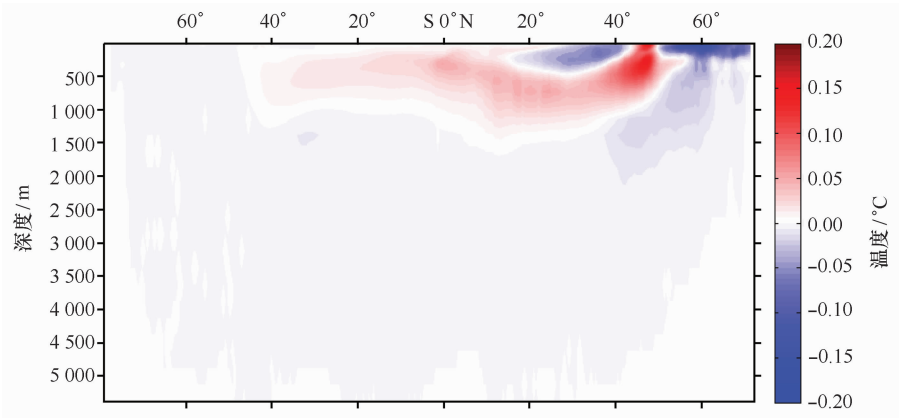


图 8 7%exp 试验 2081—2100 年大西洋纬向平均温度与控制试验的差值

Fig. 8 Zonal mean oceanic temperature anomaly between the 7%exp and the contralexp at the end of the 21st century in the Atlantic

RCP4.5 情景下 21 世纪盐比容海平面相对于 20 世纪末变化明显(图 9)。盐比容海平面在北大西洋、太平洋和东印度洋海域呈现出不同程度的上升趋势(图 9),这主要是由于该海域 500~2 000 m 的盐度急剧减小^[11]。热带大西洋、南大西洋和南大洋盐比容

海平面下降的较快,北冰洋呈现出微弱的下降趋势,这与纬向平均盐度的分布有很好的对应关系,即南极绕极流海域的盐度在 2 000 m 以上是增加的,大西洋的 20°S~35°N 海域 700 m 以上盐度明显上升^[11]。

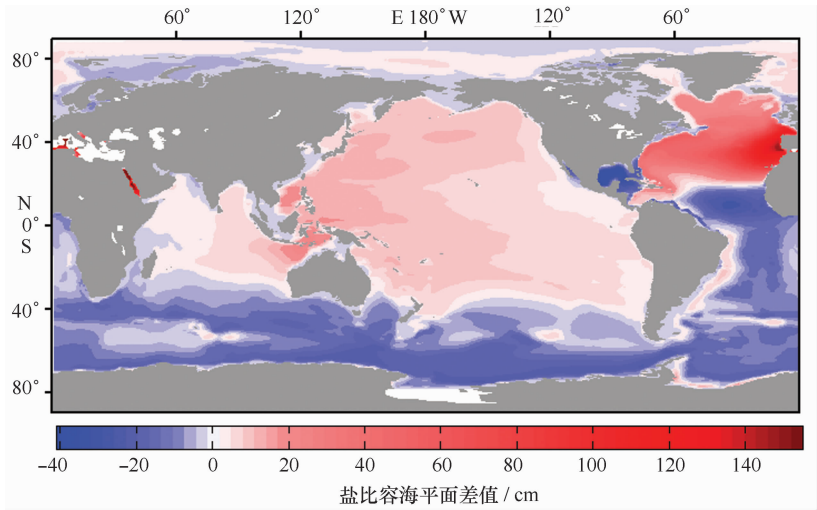


图 9 控制试验 2081—2100 年平均盐比容海平面与 1981—2000 年的差
Fig. 9 Halosteric sea level anomalies in 2081 to 2100 relative to that in 1981 to 2000

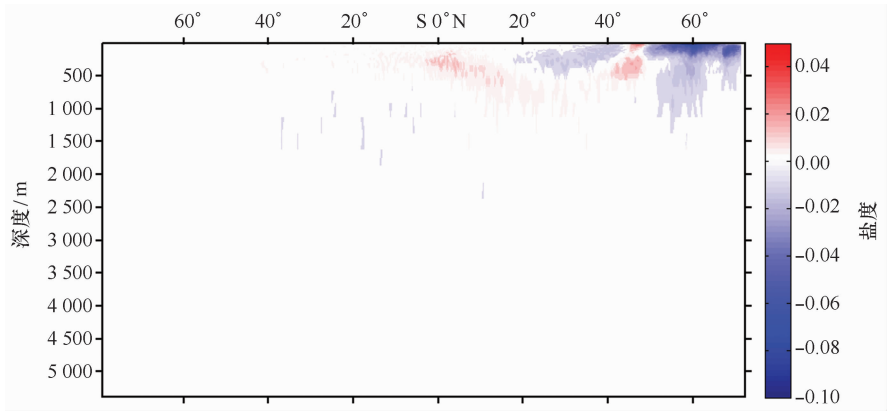


图 10 7%exp 试验 2081—2100 年大西洋纬向平均盐度与控制试验的差值
Fig. 10 Zonal mean oceanic salinity anomaly between the 7%exp and the contralex of 2081 to 2100 in the Atlantic

当格陵兰冰融化速率较小时,只会影响北大西洋的海平面变化,随着融化速率的增大,继而影响北冰洋、南大西洋、太平洋和印度洋海域的海平面变化(见图 11)。随着格陵兰冰川融化速率的增大,盐比容海平面在北冰洋、格陵兰岛南部和大西洋副热带东侧海域表现出显著的上升,欧洲北部沿岸和格陵兰岛南部上升的最快,最大可达 6 cm(见图 11c),这是由于格陵兰岛冰川快速融化导致大量的淡水流入北冰洋和

北大西洋(图 10);大西洋 45°N 附近海域和热带大西洋盐比容海平面显著下降(见图 11c),这是由于大西洋经向翻转流减弱导致了向北和向南的热盐环流减弱,从而使热带大西洋滞留了较多的高温高盐水,有一部分随着湾流被带到北大西洋副热带西侧(图 10)。

6 结论

本文利用 CCSM 在 RCP4.5 情景下的模拟结果

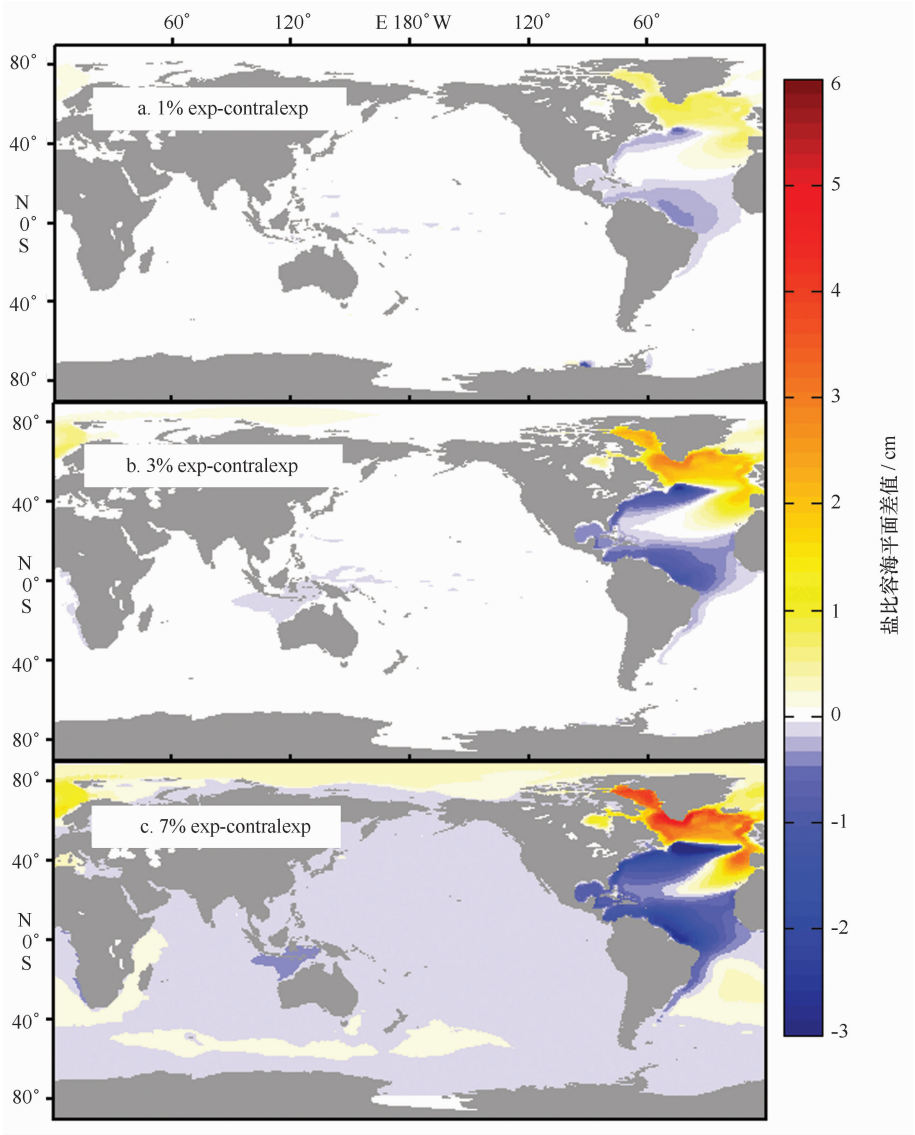


图 11 2081—2100 年平均盐比容海平面与 1981—2000 年的差
Fig. 11 Halosteric sea level anomalies in 2081 to 2100 relative to that in 1981 to 2000

作为强迫场,模拟 RCP4.5 情景下 21 世纪格陵兰冰川不同的融化速率对全球及区域海平面变化的影响。结果显示当格陵兰冰川的融化速率以每年 1% 增加时,全球大部分海域的动力海平面几乎没有变化,只有格陵兰岛南部海域和北美沿岸海域的动力海平面有所上升,南大洋的南极绕极流和赤道太平洋海域呈现出微弱的下降;热比容海平面和盐比容海平面只在北大西洋发生微弱的变化,这是因为格陵兰冰川在低速融化时并不会导致经向翻转流减弱,即拉布拉多寒流、湾流和北大西洋暖流不会发生改变。

当格陵兰冰川的融化速率以每年 3% 和 7% 增加时,随着格陵兰冰川融化速率的增加,大西洋的经向

翻转流显著减弱,动力海平面在北大西洋副极地环流海域、大西洋热带、南大西洋副热带和北冰洋呈现出显著的上升趋势,上升最快的海域是格陵兰岛南部海域和北美沿岸,这是因为格陵兰冰川融化大量的淡水输入附近海域,造成该海域的上层海洋层化加强,深对流减弱导致大西洋经向翻转流显著减弱,即拉布拉多寒流加强、湾流和北大西洋暖流减弱。

当格陵兰冰川的融化速率比较快时,热比容海平面在北冰洋、格陵兰岛南部海域和大西洋副热带海域表现出显著的下降,热带大西洋和湾流海域则上升明显;与此同时盐比容海平面的变化与热比容海平面是反相的,这是由于格陵兰岛冰川的融化速率比较大

时,大量的较冷较淡的水输入到附近海域,造成北大西洋副极地海域的海水变冷变淡、大西洋经向翻转流和热盐环流显著减弱,导致了太平洋向北冰洋的热通量和淡水通量减少,北冰洋海水变冷变淡,热带大西

洋滞留了更多的较暖较咸的海水,随着湾流被带到北大西洋,引起了湾流海域热比容海平面上升和盐比容海平面下降,北大西洋副极地海域较冷较淡的海水,被风生环流输运到副热带海域。

参考文献:

- [1] Rignot E, Kanagaratnam P. Changes in the velocity structure of the Greenland Ice Sheet[J]. *Science*, 2006, 311(5763): 986—990.
- [2] Velicogna I. Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE[J]. *Geophysics Research Letter*, 2009, 36: L19503.
- [3] Rignot E I, Velicogna M R, van den Broeke, et al. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise [J]. *Geophysics Research Letter*, 2011, 38: L05503.
- [4] Li Juan, Zuo Juncheng, Cheng Meixiang, et al. Assessing the global averaged sea level budget over 2003—2010[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(10): 16—23.
- [5] Alley R B, Clark P U, Huybrechts P, et al. Ice-sheet and sea-level changes[J]. *Science*, 2005, 310(5747): 456—460.
- [6] Katsman C A, Hazeleger W, Drijfhout S S, et al. Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt[J]. *Climatic Change*, 2007, 91(3/4): 351—374.
- [7] Pritchard H D, Arthern R J, Vaughan D G, et al. Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets[J]. *Nature*, 2009, 461: 971—975.
- [8] Huybrechts P, Janssens I, Poncin C, et al. The response of the Greenland Ice Sheet to climate changes in the twenty-first century by interactive coupling of an AOGCM with a thermomechanical ice-sheet model[C]//International symposium on Ice Cores and Climate, Kangerlussuaq (Greenland). 2001.
- [9] Jungclauss J H, Coauthors P. Will Greenland melting halt the thermohaline circulation? [J]. *Geophysics Research Letter*, 2006, 33: L17708.
- [10] Vizcaíno M, Mikolajewicz U, Gröger M, et al. Long-term ice sheet-climate interactions under anthropogenic greenhouse forcing simulated with a complex Earth System Model[J]. *Climate Dynamics*, 2008, 31(6): 665—690.
- [11] Hu A, Meehl G A, Han W, et al. Effect of the potential melting of the Greenland Ice Sheet on the meridional overturning circulation and global climate in the future[J]. *Deep Sea Research II*, 2011, 58: 1914—1926.
- [12] Gregory J M, Oerlemans J. Simulated future sea-level rise due to glacier melt based on regionally and seasonally resolved temperature changes[J]. *Nature*, 1998, 391: 474—476.
- [13] Stouffer R J, Yin J, Gregpry J M, et al. Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(8): 1365—1387.
- [14] Stouffer R J, Seidov D, Haupt B J. Climate response to external sources of freshwater: North Atlantic versus the Southern Ocean[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(3): 436—448.
- [15] Stocker T F, Broecker W S. Observation and modeling of North Atlantic deep water formation and its variability: Introduction[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(12): 317.
- [16] Schmittner A, Latif M, Schneider B. Model projections of the North Atlantic thermohaline circulation for the twenty-first century assessed by observations[J]. *Geophysical Research Letter*, 2005, 32: L23710.
- [17] Meehl G A, Stocker T F. Global climate projections[R]//IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 747—845.
- [18] Hu A, Meehl G A, Han W Q, et al. Transient response of the MOC and climate to potential melting of the Greenland Ice Sheet in the twenty-first century[J]. *Geophysical Research Letter*, 2009, 36(10): L10707.
- [19] Hu A, Meehl G A, Han W Q, et al. Influence of continental ice retreat on future global climate[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(3): 3087—3111.
- [20] Kopp R E, Mitrovica J X, Griffies S M, et al. The impact of Greenland melt on local sea levels: a partially coupled analysis of dynamic and static equilibrium effects in idealized water-hosing experiments[J]. *Climatic Change*, 2010, 103: 619—625.
- [21] Gregory J M, Church J A, Boer G J, et al. Comparison of results from several AOGCMs for global and regional sea-level change 1900—2100[J]. *Climate Dynamics*, 2001, 18(3/4): 225—240.
- [22] Yin J J, Schlesinger M E, Stouffer R J. Model projections of rapid sea-level rise on the northeast coast of the United States[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(2): 262—266.
- [23] Rio M H, Hernandez F. A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: C12032.
- [24] Sakai K, Peltier W R. Dansgaard Oeschger Oscillation in a coupled atmosphere—Ocean climate model [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10(2): 949—970.

The influence of the melting rate of the Greenland ice sheet on the sea level variation for 21st century

Li Juan^{1,2}, Zuo Juncheng², Tan Wei², Chen Meixiang², ZhaoXue¹

(1. *South China Sea Marine Prediction Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China*; 2. *Coastal and offshore Engineering Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The influence of the different melting rate of Greenland ice sheet on sea level of the global and regional ocean are studied based on POP model under the RCP4.5 scenario for the 21st century. In the 21st century, the low melting rate of Greenland ice sheet has small influence on the global and regional sea level variations, which mainly due to the meridional overturning flow doesn't weak under the low melting rate of Greenland ice sheet in the Atlantic. The high melting rate will have notably effect on the dynamic and steric sea level in the Atlantic, the Arctic and Antarctic Circumpolar Current (ACC). The dynamic sea level will significantly rise in the north Atlantic subpolar Ocean, tropical Atlantic Ocean, the south Atlantic subtropical and Arctic Ocean, which will rise fast in ocean of southern Greenland and along the coast of North America, that is due to notable weakened of the meridional overturning flow caused by strengthen stratification of the upper ocean and deep convection weakened because of a lot of fresh water input Greenland nearby ocean in the high rate of melting of Greenland ice sheet, namely the labrad or current will strengthen, the Gulf Stream and the north Atlantic current weakened. The thermosteric sea level will significantly decline in the Arctic ocean, the ocean of the southern Greenland and the Atlantic subtropical ocean, while which obviously rise the tropical Atlantic ocean and the Gulf Stream. Meanwhile the halosteric sea level change will be opposite to the thermosteric sea level. The steric sea level showed change due to the water is cooling and thin in the north Atlantic subpolar ocean, the weakened of the Atlantic meridional overturning flow and thermohaline circulation caused by input of lot of low temperature and low salt water in the 21st century.

Key words: sea level variation; 21st century; Greenland ice sheet; RCP4.5; meridional overturning flow