

不同辐射背景下大西洋热盐环流下沉区混合层深度变化*

李菁楠 陈学恩

(中国海洋大学 海洋环境学院 青岛 266100)

提要 基于政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)4种最新辐射强迫情景,利用 ECHAM5/MPI-OM(European Centre Hamburg Model 5/ Max Planck Institute Ocean Model)气候模式输出的 1850—2300 年逐月混合层深度、海表面温度、海表面盐度数据,分析大西洋热盐环流下沉区混合层深度的变化情况。结果表明:随辐射强迫增加,热盐环流下沉区混合层深度下降,混合层深度振荡周期在格陵兰-冰岛-挪威海(Greenland Sea – Iceland Sea – Norwegian Sea, GIN)海域减小,在拉布拉多海(Labrador Sea, LAB)海域变化不大;与 GIN 海域相比,LAB 海域混合层深度对辐射强迫变化更敏感;两海区温度对混合层深度的影响时间较长,混合层深度对盐度的变化反应迅速;混合层深度变化的主导因素在 LAB 海域中为盐度,而在 GIN 海域,低辐射强迫下温度主导混合层深度变化,中高辐射强迫下温度与盐度共同起主导作用。

关键词 辐射强迫;混合层;热盐环流;代表性浓度路径(representative concentration pathways, Rcps);海气耦合

中图分类号 P725 **doi:** 10.11693/hyhz20130600069

大西洋热盐环流(thermohaline circulation, THC)是全球尺度的海洋环流,对全球子午向热量输送起到重要作用,在气候变化中占有重要地位(黄建斌等, 2008; Wunsch, 2002; Lumpkin *et al*, 2003)。表层水在高纬地区的下沉是热盐环流的重要驱动力,对气候平衡态的影响很大,而混合层深度是表征深层水生成率强弱的一个重要物理量,受到如太阳辐射、风应力、海气热量交换等多个因素的影响。混合层深度越深,表明垂直的深层对流越强,有更多的表层水密度增加,下沉变为深层水(牟林, 2007)。海洋中的混合层直接与大气接触,是海洋的上界面,同时是与大气进行热量、动量及物质交换的重要场所,因此对海洋混合层深度的研究在海气相互作用研究中占有重要地位。关于 THC 下沉海流的研究,已有不少科学家作出贡献(牟林等, 2010; 朱江等, 2012)。普遍认为,如果全球变暖导致 THC 下沉减弱或中断,对区域乃至全

球气候的影响将是灾难性的(Manabe *et al*, 1999; Schmittner *et al*, 1999)。在辐射强迫增大、温室气体浓度增加的情况下,全球变暖,海表温度升高,同时大气中的水汽含量增加,淡水的经向输运加强,即副热带地区蒸发增强,副极地地区降雨增加。大量淡水补充导致 THC 下沉海域海表盐度下降,深层对流减弱,THC 强度随之减弱,进而影响欧洲气候。约 11000—10000 年前的“新仙女木冷事件”(Dansgaard *et al*, 1993)即被认为与 THC 下沉的减弱有关:冰川融化令大量淡水流入北大西洋,海表盐度降低,海水下沉被抑制,热盐环流中断,经向热输送剧减,欧洲气候变冷(Broecker, 1990)。

此前的研究多是基于单一辐射强迫环境对北大西洋高纬海域进行研究,缺乏 THC 对未来辐射强迫情景变化响应的探讨。辐射强迫情景是政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate

*海洋公益性行业科研专项经费资助项目, 201005019 号。李菁楠, 硕士研究生, E-mail: ljnouc@hotmail.com

通讯作者: 陈学恩, 教授, E-mail: xchen@ouc.edu.cn

收稿日期: 2013-06-03, 收修改稿日期: 2013-07-18

Change, IPCC)为统一全球海气耦合模拟实验、方便各个模式比较评估而提出的最新温室效应指标,是根据已存在的科学文献设立的一套稳定、缓和的基准排放情景,用单位面积辐射强迫表示温室气体的稳定浓度。代表性浓度路径(representative concentration pathways, Rcps)是一种重要的辐射强迫情景,目前共设立 4 组 Rcps 情景,分别为 Rcp2.6、Rcp4.5、Rcp6 和 Rcp8.5, 对应数字表示 2006—2100 年,辐射强迫的数值,单位为 W/m^2 。为研究更长时间尺度的气候变化,IPCC 又对应设立 4 组延伸浓度路径(Extended Concentration Pathways, Ecps), 时间长度为 2101—2300 年,是 Rcps 情景的延伸部分。本文将 Rcps 与对应的 Ecps 统称 Rcps 情景。另外,以历史辐射强迫数据资料为背景可以通过数值模式反演出 1850—2005 年的海洋大气数据资料,这段时间的辐射强迫背景称为历史辐射强迫(Historical)情景,下文简称 His 情景(Sturges *et al.*, 2000; Detlef *et al.*, 2011)。本文对处于辐射强迫条件变化情景下的 THC 下沉区的动态变化进行分析,通过数值模拟实验中不同辐射强迫背景的输出数据来模拟温室效应引起的大西洋表层水下沉区变化,重点研究在 ECHAM5/MPI-OM(European Centre Hamburg Model 5/ Max Planck Institute ocean model)模式中,不同辐射强迫情景下,格陵兰-冰岛-挪威海(Greenland Sea-Iceland Sea-Norwegian Sea, GIN)海域和拉布拉多海(Labrador sea, LAB)海域混合层深度及其振荡周期的变化,并就两海区海表面温度、盐度对混合层深度的影响进行了探讨。

1 数据与研究方案

1.1 数据说明

本文采用 ECHAM5/MPI-OM 气候模式输出的海洋数据进行研究。该模式由德国马克思-普朗克气象研究所(Max-Planck Institute for Meteorology)开发,是第 5 次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5, CMIP5)参评模式之一,其关于全球气候变化的模拟结果被 IPCC 第 4 次评估报告(Fourth Assessment Report, AR4)所引用。根据学者研究及 IPCC AR4 提供的结果, ECHAM5/MPI-OM 气候模式对降水、气压、气温及海洋混合层深度的模拟结果非常接近实际观测(周天军等, 2005; 牟林等, 2010),因此本文使用的数据具有相当的可靠性。

数据在全球呈不规则水平网格分布,网格数为 256×220 个(经向为 256 个,纬向为 220 个),网格精

度最小在格陵兰岛附近为 15km,最大在赤道附近为 284km,平均精度为 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 。垂向网格共分 40 层,层厚随水深逐渐增大,在海表面以下 90m 内有 8 层,600m 内有 20 层(Jungclaus *et al.*, 2005)。这套数据模拟了不同辐射强迫情景下全球气候系统演变过程。

根据大西洋热盐环流表层水的下沉位置的不同,下沉流海域分为 GIN 海域和 LAB 海域(牟林, 2007; 牟林等, 2011)。所使用的数据范围为 $66^\circ-77^\circ N$, $20^\circ W-10^\circ E$ (GIN 海域)和 $50^\circ-60^\circ N$, $60^\circ-25^\circ W$ (LAB 海域)。文中采用 His、Rcp2.6、Rcp4.5、和 Rcp8.5 情景数据,从 His 情景到 Rcp8.5 情景,辐射强迫值逐渐增大。3—5 月、6—8 月、9—11 月、12—2 月分别代表春、夏、秋、冬四季。

海洋中的混合层存在着不同的定义,本文中混合层深度的定义为:从表层向下算起,当现场密度同表层密度相比变化达到 0.125 时所在的深度为混合层深度(Delworth *et al.*, 1993, 2000; Timmermann *et al.*, 1998)。

1.2 研究方案

如表 1 所示,在辐射强迫和季节相同时,GIN 海域和 LAB 海域混合层深度存在显著差异。因此在对不同辐射强迫情景的研究中,也应当将两个海域混合层深度分别研究进行对比。由于所研究海域混合层四季震荡趋势相同,春季混合层深度最大,最适合用来观察混合层深度变化,因此本文选择春季混合层深度作为混合层深度变化的代表,并将春季区域平均混合层深度定义为混合层指数,通过小波分析方法求得各辐射强迫情景下混合层指数的周期,探讨混合层在不同辐射强迫背景下的变化情况,从而对比两海域混合层在各辐射强迫情景下的变化。

表 1 不同辐射强迫情景下 GIN 海域和 LAB 海域四季平均混合层深度(单位: m)

Tab.1 Average depth of mixed layer in the GIN (Greenland Sea-Iceland Sea-Norwegian Sea) area and LAB (Labrador Sea) area of four seasons under four radiative forcing scenarios (units: m)

海域	季节	His	Rcp2.6	Rcp4.5	Rcp8.5
GIN	春	879.9	597.6	496.7	326.5
	夏	34.2	31.8	30.4	23.4
	秋	154.3	141.5	118.4	76.5
	冬	822.4	584.2	489.0	314.5
LAB	春	747.9	663.5	502.2	194.4
	夏	21.5	19.0	17.4	13.9
	秋	50.9	47.6	41.7	31.3
	冬	644.0	548.3	403.1	167.4

由于混合层深度与其海表热盐状况联系紧密,因此本文特别针对 GIN 海域和 LAB 海域海表温度和盐度进行研究,利用超前/滞后相关方法分别分析两海域的海表温度、盐度对混合层深度的影响,并且讨论这种影响在不同辐射强迫情景下的改变。

2 不同辐射强迫情景下的混合层深度变化

2.1 混合层深度及其周期变化

混合层深度在不同辐射强迫背景下的变化见图 1。随着辐射强迫增加,混合层平均深度整体呈下降趋势,这是由于海表温度和盐度共同作用引起的:海表温度上升或海表盐度下降导致海洋表层水密度降低,下沉流减弱,最终混合层深度减小。在 GIN 海域,His 情景下混合层平均深度为 879.88m, Rcp2.6、Rcp4.5

和 Rcp8.5 对应平均深度分别为 597.64、496.66 和 326.454m,与 His 情景相比混合层平均深度降低 32.07%、43.55%、62.90%;在 LAB 海域,His 情景下混合层平均深度为 747.86m, Rcp2.6、Rcp4.5 和 Rcp8.5 对应平均深度分别为 663.54、520.19 和 194.39m,与 His 情景相比混合层平均深度降低 11.27%、30.44%、74.01%,可见 LAB 海域混合层平均深度降低较快。分别考察 Rcps 情景下两海域混合层平均深度变化区间,GIN 海域为 600(Rcp2.6)—200m(Rcp8.5), LAB 海域为 700(Rcp2.6)—50m(Rcp8.5), LAB 海域变化幅度明显大于 GIN 海域。同时在 Rcps 情景下,GIN 海域混合层平均深度变化平稳, LAB 海域混合层平均深度变化曲线振幅较大。以上均说明 LAB 海域混合层对辐射强迫变化更敏感。

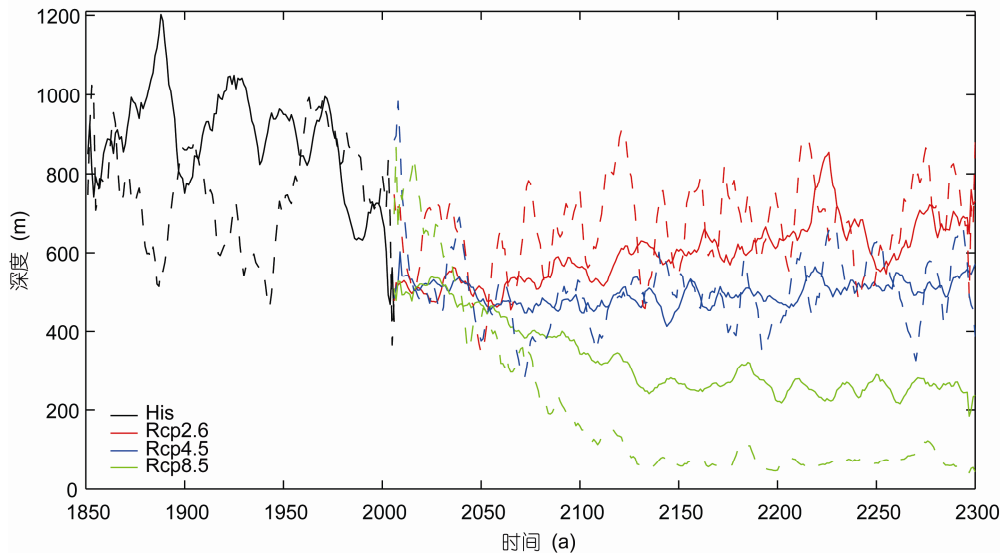


图 1 不同辐射强迫情景下,GIN 海域(实线)和 LAB 海域(虚线)混合层平均深度时间序列

Fig.1 Time series of average depth of mixed layer in the GIN (full line) area and LAB (dotted line) area under four radiative forcing scenarios

混合层深度变化周期也是衡量混合层变化的重要指标之一,对混合层平均深度进行小波分析,得到各辐射强迫情景下的混合层深度变化周期。图 2 小波分析结果显示,在 GIN 海域,1850—2005 年混合层深度变化周期为 16—64a,以 50a 为主。辐射强迫增大后:在 Rcp2.6 情景下,周期为 20—40a,以 32a 为主;在 Rcp4.5 和 Rcp8.5 情景下,周期为 12—40a,主导周期为 16a 和 32a。图 3 小波分析结果显示,在 LAB 海域,1850—2005 年混合层深度变化周期为 50a 左右。辐射强迫增大后:在 Rcp2.6 情景下,周期为 10—32a,主导周期为 18a 和 24a;在 Rcp4.5 和 Rcp8.5 情景下,周期为 12—32a,主导周期为 24a。可见在两海域辐射

强迫对震荡周期的影响不同,GIN 海域震荡周期随辐射强迫增加而减小,LAB 海域混合层震荡周期随辐射强迫增大变化不明显。

2.2 不同辐射强迫背景下混合层深度标准差

标准差是对一组数据分散程度的度量。通常,标准差较大代表大部分数值和其平均值之间差异较大;标准差较小代表这些数值较接近平均值。图 4 代表各辐射强迫情景下混合层深度变化的标准差,由图 4 可见,混合层深度主要的变化区域是 GIN 和 LAB 海域,随辐射强迫增加,标准差逐渐减小,表示混合层深度变化逐渐趋于稳定,向定常态发展。在 GIN 海域,与 His 情景相比,Rcp2.6、Rcp4.5、Rcp8.5 情景的标准差

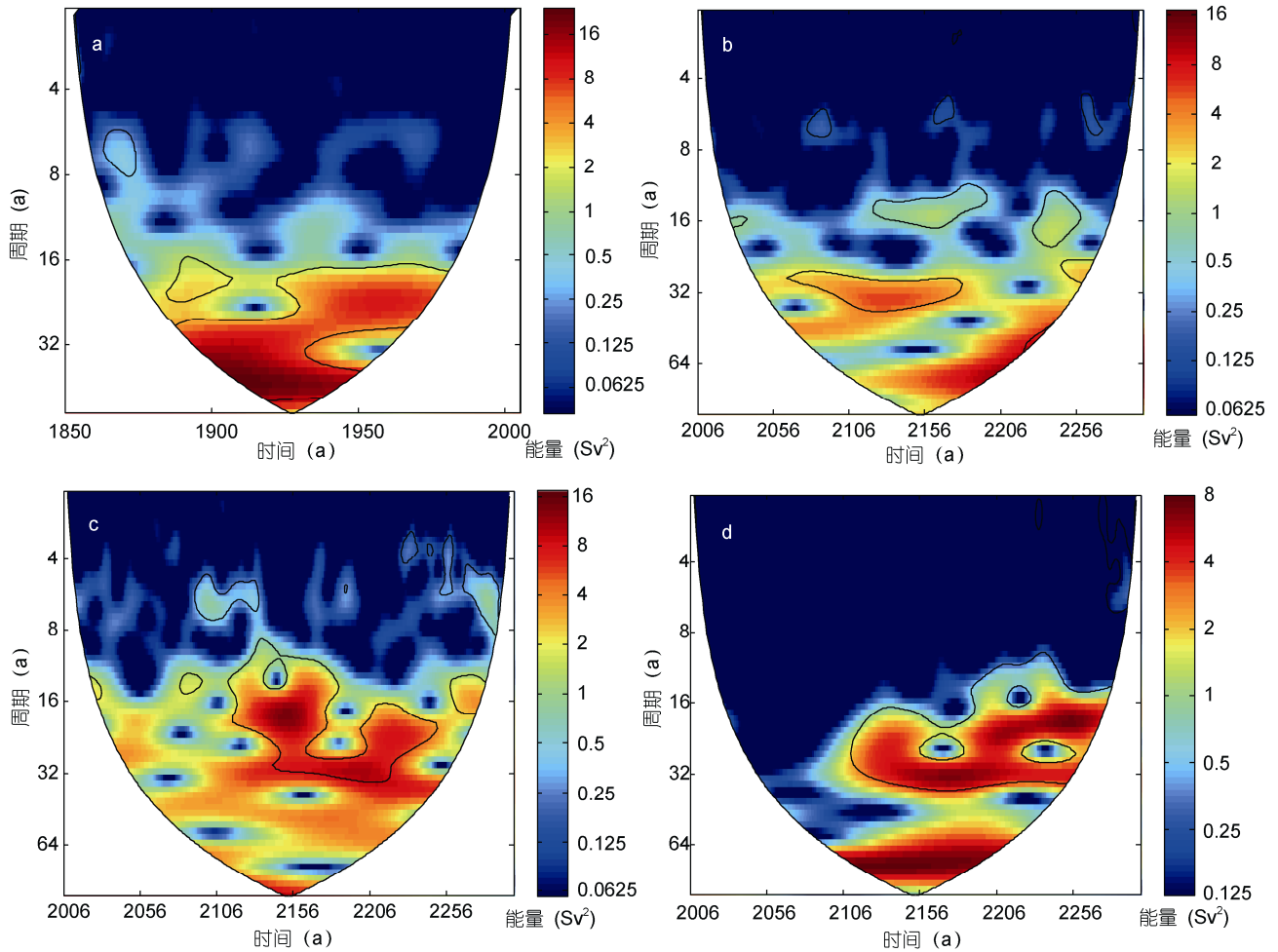


图 2 对 His(a)、Rcp2.6(b)、Rcp4.5(c)和 Rcp8.5(d)情景下 GIN 海域混合层平均深度的小波分析

Fig.2 Wavelet analysis of mixed layer average depth in GIN area under His (a), Rcp2.6 (b), Rcp4.5 (c) and Rcp8.5 (d) scenarios
粗黑色实线框包围的区域: 相关系数超过 95%的置信度检验; 圆锥形黑色细实线外侧: 受边缘效应影响的不可信区域(图 3 同)

平均值分别下降了 60%, 80%, 92%; 在 LAB 海域, 对应下降值为 40%, 42%, 54%。与 LAB 海域相比, GIN 海域标准差下降较大, 说明 GIN 海域由不定常态向定常态的形态转变较大。

3 海表温盐要素对混合层深度的影响

在 4 种辐射强迫情景中, GIN 海域和 LAB 海域平均海表面盐度的变化情况如图 5 所示。在 Rcps 情景中, 随着辐射强迫增加, 表层海水盐度减小, 这是由于辐射强迫增加导致了高纬度地区淡水输入增加, 使得盐度下降, 包括大气环流加快导致的高纬地区降雨增加(牟林, 2007)和海冰融化导致的淡水输入增强。在淡水输入增强的同时, 辐射强迫增加引发了大西洋 THC 减弱, 因而向北输送的高盐水总量减小, 下沉海区海水盐度输入降低, 这也是表层盐度降低

的原因。GIN 海域表层海水盐度始终高于 LAB 海域, 这是两海域不同地形作用的结果, GIN 海域南部格陵兰-苏格兰海脊(距离海表 600m)阻碍了底层海水流出, 而 LAB 海域与大西洋直接连通, 水交换自由, 因此 GIN 海域盐度始终高于 LAB 海域。

图 6 展示了在 4 种辐射强迫情景中, 两下沉海域平均海表面温度的变化情况。随着辐射强迫增加, 表层海水温度整体呈上升趋势。尽管 THC 减弱导致高温入流水减少, 抑制了海水温度的升高, 但辐射强迫增加对海表温度的直接增温抵消了该效应。由图 6 可见, 在 His 辐射强迫情景下, GIN 海域表面温度低于 LAB 海域; 但随着辐射强迫增加, 在 Rcp2.6, Rcp4.5 辐射强迫情景下, GIN 海域海表面温度与 LAB 海域相当; 在 Rcp8.5 辐射强迫情景下, GIN 海域海表面温度超过 LAB 海域。这与 GIN 海域的海冰覆盖有关: 在

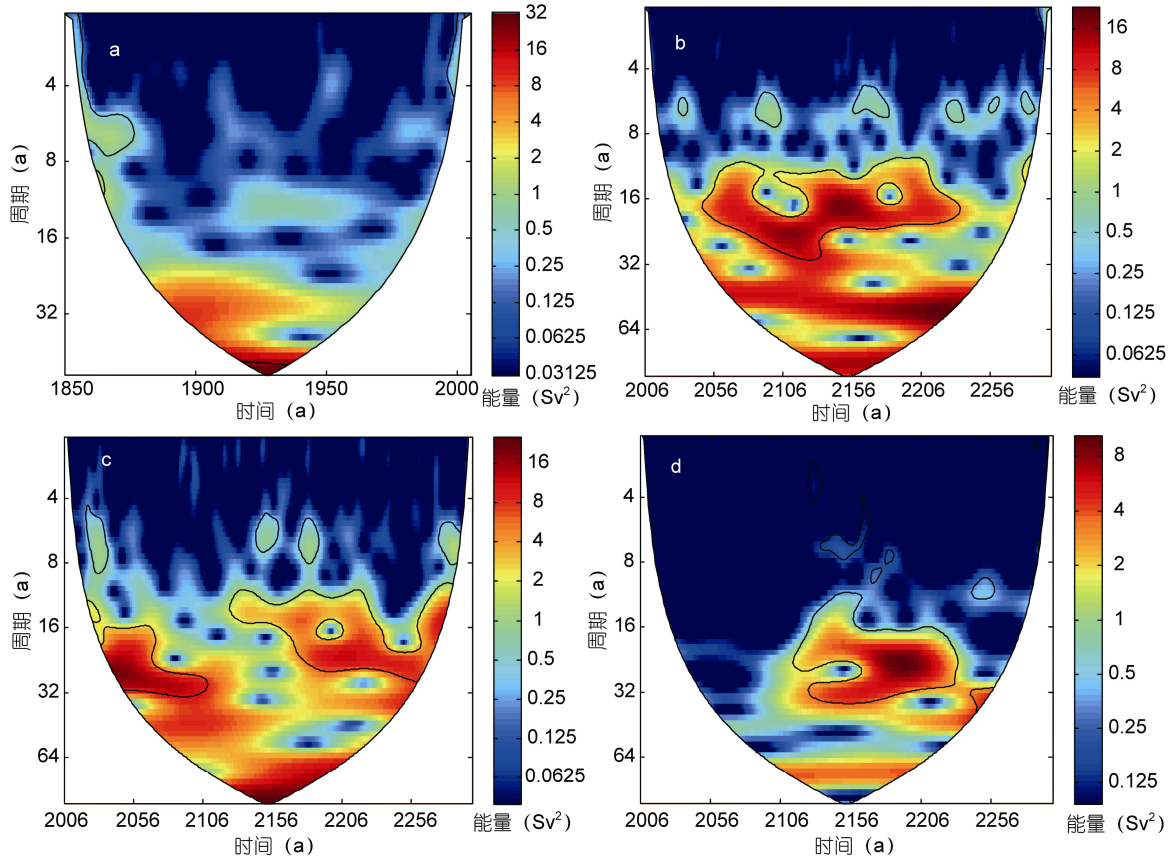


图3 对 His(a)、Rcp2.6(b)、Rcp4.5(c)和 Rcp8.5(d)情景下 LAB 海域混合层平均深度的小波分析
 Fig.3 Wavelet analysis of mixed layer average depth in LAB area under His (a), Rcp2.6 (b), Rcp4.5 (c) and Rcp8.5 (d) scenarios

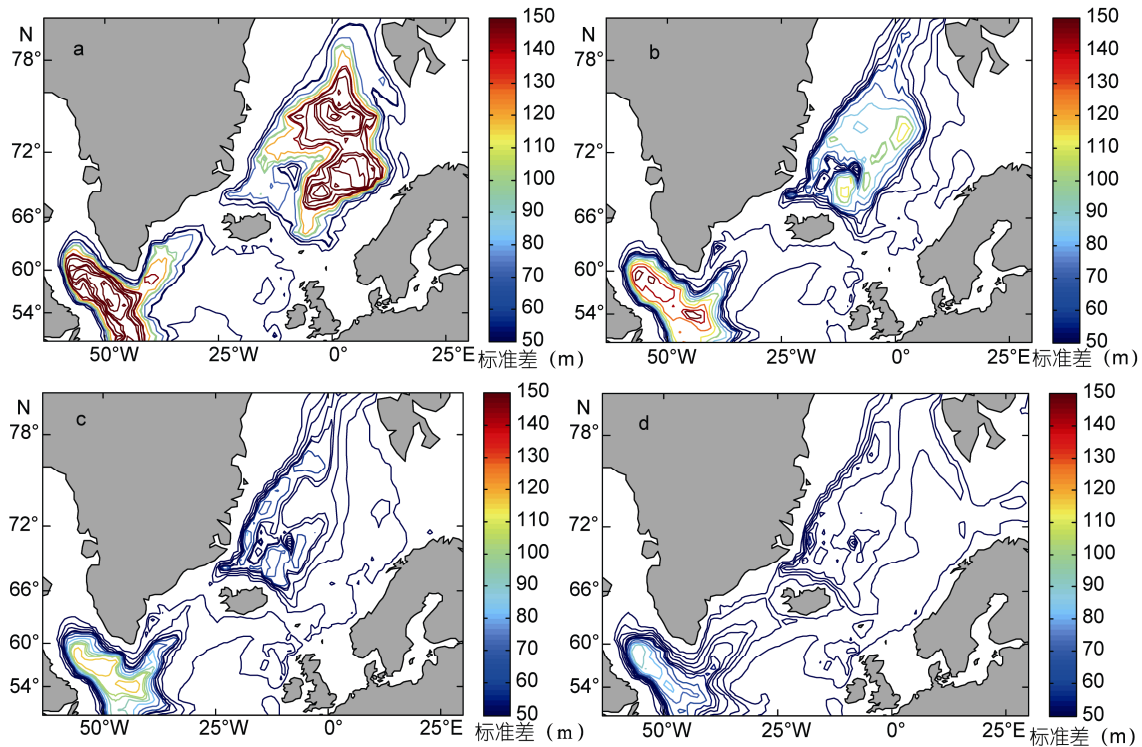


图4 His(a)、Rcp2.6(b)、Rcp4.5(c)和 Rcp8.5(d)情景下混合层深度的标准差
 Fig.4 Standard deviation of mixed layer depth under His (a), Rcp2.6 (b), Rcp4.5 (c) and Rcp8.5 (d) scenarios

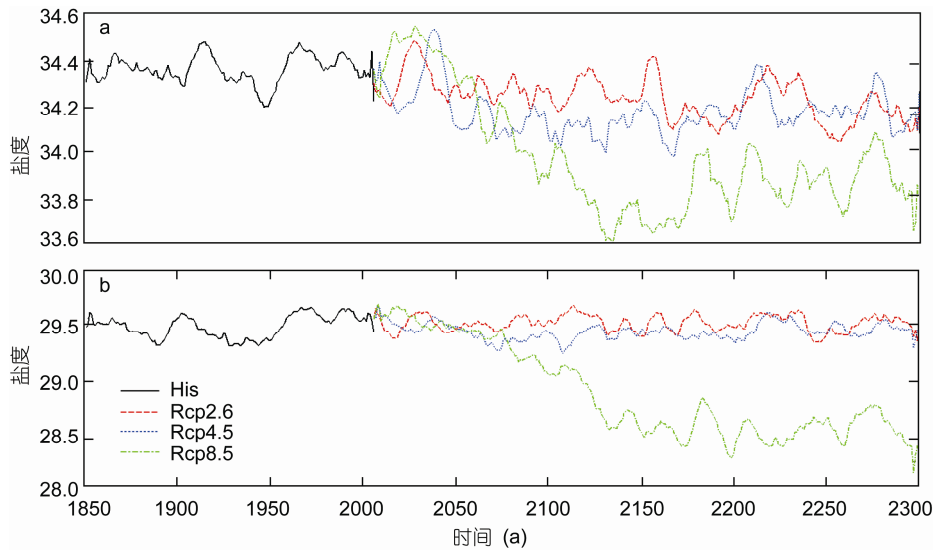


图 5 4 种辐射强迫情景下, GIN 海域(a)和 LAB 海域(b)春季海洋表面盐度区域平均值的时间序列

Fig.5 Time series of spring sea surface salinity's regional average in the GIN (a) and LAB (b) area under four radiative forcing scenarios

高辐射强迫情景下, GIN 海域海冰对辐射的正反馈机制增大了该地区温度升高效应(IPCC, 2007), 具体地说, 海冰对太阳辐射具有较高的反射作用, 在高辐射强迫背景下海冰融化, 反射率降低, 海表面接收大气热通量增加, 海表面温度升高, 又进一步促进了海冰融化, 形成正反馈机制。另一方面, GIN 海域热平衡主要取决于和大气的热交换, 而 LAB 海域热量来自主要大西洋 THC 热输送。当辐射强迫较高时, 大西洋 THC 强度减弱, 向北的热量输送减小, LAB 海域热量来源减小。而由于辐射强迫的作用 GIN 海域接受大气热通量增大, 因此, 在高辐射强迫情景下, 纬度较高的 GIN 海域海表面温度反而超过纬度较低的 LAB 海域。

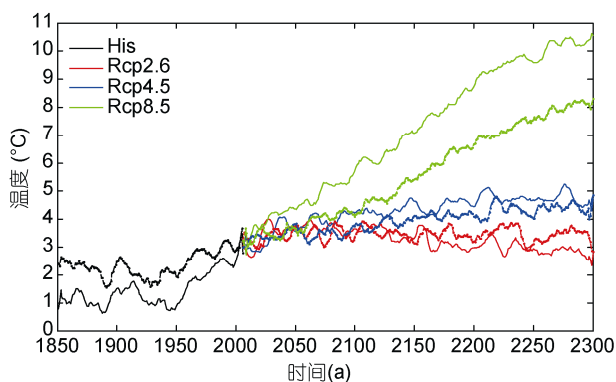


图 6 4 种辐射强迫情景下, GIN 海域(实线)和 LAB 海域(虚线)海洋表面温度区域平均值的时间序列

Fig.6 Time series of spring sea surface temperature's regional average in the GIN and LAB area under four radiative forcing scenarios

图 7 表示对两海域海表面盐度、温度与混合层深度进行超前/滞后相关分析, 混合层深度变化滞后于海洋参数变化时, 滞后时间为正, 反之则滞后时间为负。

当下沉海域海表盐度降低时, 海表面海水密度下降, 不利于表层海水下沉, 进而导致混合层深度的减小, 因此海表面盐度与混合层深度的相关性为正。在 GIN 海域中, His 情景最大正相关系数为 0.69(置信度>95%), 对应盐度变化滞后于混合层深度变化 55a; Rcp2.6 情景中最大相关系数 0.13(置信度>95%), 相关性不显著。Rcp4.5 情景最大相关系数 0.48(置信度>95%), 盐度变化与混合层深度变化同步。Rcp8.5 情景最大相关系数 0.9(置信度>95%), 盐度变化与混合层深度变化同步。在 LAB 海域中, His 情景下海表面盐度与混合层深度的最大正相关系数为 0.84(置信度>95%), 对应混合层深度变化滞后于盐度变化 3a; Rcp2.6 情景中最大相关系数 0.62(置信度>95%), 该点混合层深度变化滞后于盐度变化 2a。Rcp4.5 情景最大相关系数 0.69(置信度>95%), 混合层深度变化滞后于盐度变化 2a。Rcp8.5 情景中最大相关系数达到 0.93(置信度>95%), 混合层深度变化滞后于盐度变化 42a。不仅盐度的变化直接对混合层深度造成影响, 根据上文分析, 混合层深度减小引起 THC 强度减弱, 同样会导致海表盐度降低。因此, 下沉海区混合层深度减小与海表盐度降低是一个互为因果的复杂变化, 可以看作一个正反馈机制, 当海表盐度作为变化的主动因素时, 混合层深度变化滞后于盐度变化。

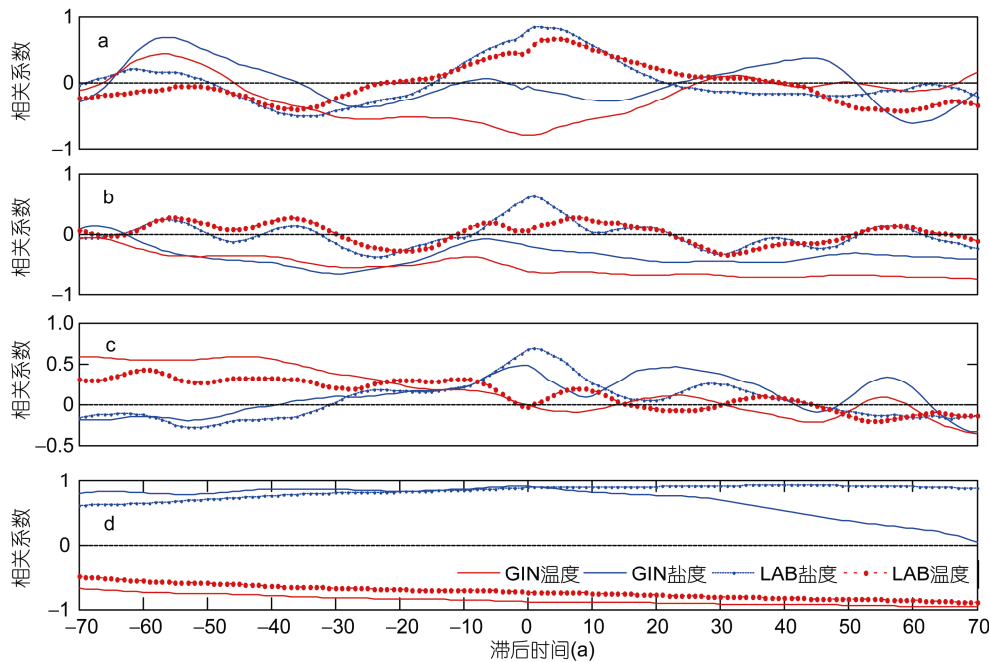


图7 GIN 海域、LAB 海域的海水表面盐度、温度与混合层深度在 His(a)、Rcp2.6(b)、Rcp4.5(c) 和 Rcp8.5(d) 情景下的超前/滞后相关性分析

Fig.7 Lag correlation analysis of sea surface salinity (blue), sea surface temperature (red) with mixed layer depth in GIN area (full line) and LAB area (dotted line) under His (a), Rcp2.6 (b), Rcp4.5 (c) and Rcp8.5 (d) scenarios

当下沉海区海表温度较高时, 由于海水体积膨胀使得表层海水密度减小, 同样不利于海水下沉, 会导致混合层深度减小。因此海表面温度与混合层深度的相关性为负: 在 GIN 海域中, His 情景最大负相关系数为 -0.80 (置信度 $>95\%$), 对应混合层深度变化滞后于温度变化 4a; Rcp2.6 情景中最大负相关系数 -0.35 (置信度 $>95\%$), 对应混合层深度变化滞后于温度变化 25a。在 LAB 海域, His 情景最大负相关系数为 -0.40 (置信度 $>95\%$), 温度变化滞后于混合层深度变化 35a。Rcp2.6 情景最大负相关系数 -0.33 (置信度 $>95\%$), 混合层深度变化滞后于温度变化 32a。理论上, 海表温度较高导致混合层深度减小, 会引起 THC 强度减弱, 北大西洋暖流向高纬度输送的热量减小, 海表温度降低, 混合层深度增加(牟林, 2007)。这个负反馈过程可认为是混合层深度震荡的自我调节机制, 因此海表的温度变化, 又是混合层变化的一个直接原因, 当海表温度作为变化的主动因素时, 混合层深度变化滞后于温度变化。

通过两海区热盐相关系数对比可以发现: 在 GIN 海域低辐射强迫情景下(His, Rcp2.6)温度相关系数绝对值大于盐度, 是影响混合层深度的主要因素, 在中高辐射强迫情景下(Rcp4.5, Rcp8.5), 盐度对混

合层深度的影响逐渐增大, 与温度共同对混合层深度产生作用; 而在 LAB 海域所有强迫辐射条件下, 盐度始终为混合层深度的主要影响因素。

4 结论

本文基于 4 种辐射强迫情景下 ECHAM5/MPI-OM 气候模式输出的 1850—2300 年逐月混合层深度、海表面温度、海表面盐度等相关数据, 针对北大西洋热盐环流 GIN 和 LAB 2 个海流下沉区域进行分析, 得出 2 个下沉海域在不同辐射强迫情景下海洋参数变化的共性与特性, 共性主要有以下 3 点: (1)辐射强迫条件的改变显著影响了北大西洋热盐环流高纬下沉区域混合层深度, 随着辐射强迫增加, 两海区混合层深度均有所减小。(2)混合层深度在各情景间的变化值并不是固定不变的, 而是随着辐射强迫的增加而减小, 同时两海区混合层深度变化标准差也随着辐射强迫的增加而减小, 这说明了随辐射强迫增加, 混合层深度变化逐渐趋于稳定, 向定常态发展。(3)两海域中混合层深度对盐度的变化反应更为迅速。

除以上共性外, 在分析中发现不同辐射强迫情景下两海域各自的变化特点: (1)在同一辐射强迫情景下 LAB 海域混合层深度振幅、不同辐射强迫情景

下混合层深度变化范围均大于 GIN 海域, 表明 LAB 海域混合层对辐射强迫变化更敏感。(2)混合层深度震荡周期在两海域呈现出不一样的变化规律, GIN 海域震荡周期随辐射强迫增加而减小, 主导周期由 50a 逐渐降至 16a, 但在 LAB 海域混合层震荡周期随辐射强迫增大变化不明显, 除在 His 情景下为 50a 外, 其余 3 种情景均在 24a 左右。(3)海表盐度对 LAB 海域混合层深度的影响大于海表温度对该海域混合层深度的影响, 且超前/滞后影响时间短, 常出现同步相关性, 而温度对混合层深度的超前/滞后影响时间长, 时间尺度在十年际量级。因此在 LAB 海域的混合层深度变化中, 盐度起主要作用。而在 GIN 海域, 盐度和温度在不同辐射强迫情景下的主导作用不同。

在不同辐射强迫情境下, 温盐对混合层深度的影响总结如下: 在 His 辐射强迫情景下, GIN 海域温度小于 LAB 海域, 低温有利于表层海水下沉, 在此情景下 GIN 海域混合层深度大于 LAB 海域。在 Rcp2.6 及 Rcp4.5 辐射强迫情景下, GIN 海域温度与 LAB 海域相当, 虽然在 Rcp4.5 辐射强迫情景下 GIN 海域影响混合层深度的主导因素由温度转变为盐度, 但两海域盐度几乎不变, 因此这 2 种情形下混合层深度差别不大。而在 Rcp8.5 情景下, 两海域温度盐度变化较大, GIN 海域温度远大于 LAB 海域, 海表高温阻碍海水下沉, 但此情景下 GIN 海域混合层主导因素为温盐共同作用, 盐度的变化导致 GIN 海域深度大于 LAB 海域。同时, 两海域同样以盐度作为混合层深度主导因素时, 尽管 LAB 海域盐度变化值大于 GIN 海域, 但海域深度却小于 GIN 海域, 说明 GIN 海域当以盐度变化为主导因素时, 混合层深度对盐度变化敏感性高。

参 考 文 献

- 朱 江, 杨海军, 2012. 北大西洋热盐环流对温室气体浓度变化的响应. 北京大学学报(自然科学版), 48(2): 231—238
- 牟 林, 2007. 不同 CO₂ 浓度情景下热盐环流的演变. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 2—77
- 牟 林, 张建立, 陈学恩等, 2010. 大西洋热盐环流年代际变化机制研究: I 气候模式的建立和验证. 海洋学报, 32(6): 11—23
- 牟 林, 陈学恩, 宋 军等, 2011. 大西洋热盐环流年代际变化机制研究: II 热盐环流年际和年代际变化机制研究. 海洋学报, 33(1): 17—26
- 周天军, 宇如聪, 刘喜迎等, 2005. 一个气候系统模式中大洋热盐环流对全球变暖的响应. 科学通报, 50(3): 269—275
- 黄建斌, 周天军, 朱锦红等, 2008. 与热盐环流相关的海温异常对大西洋沿岸气候影响的诊断模拟研究. 自然科学进展, 18(2): 154—160
- Broecker W S, 1990. What drives glacial cycles? Scientific American, 262: 49—56
- Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B *et al*, 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. Nature, 364: 218—220
- Delworth T L, Greatbatch R, 2000. Multidecadal thermohaline circulation variability driven by atmospheric surface flux forcing. J Climate, 13: 1481—1495
- Delworth T L, Manabe S, Stouffer R J, 1993. Interdecadal variation of the thermohaline circulation in a coupled ocean atmosphere model. J Climate, 6: 1993—2011
- Detlef P, Vuuren V, Edmonds J *et al*, 2011. The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change, 109 (1—2): 5—31
- IPCC, 2007. Climate change 2007: the physical science basis summary for policymakers. In: Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 22
- Jungclauss J H, Keenlyside N, Botzet M *et al*, 2005. Ocean circulation and tropical variability in the coupled model eham5/mpi-om. Journal of Climate-Special Section, 19: 3952—3972
- Lumpkin R, Speer K, 2003. Large-scale vertical and horizontal circulation in the North Atlantic Ocean. Journal of Physical Oceanography, 33: 1902—1920
- Manabe S, Stouffer R J, 1999. The role of thermohaline circulation in climate. Tellus, 51A-B: 91—109
- Schmittner A, Stocker T F, 1999. The stability of the thermohaline circulation in global warming experiments. J Climate, 12: 1117—1133
- Sturges W T, Wallington, T J, Hurly M D *et al*, 2000. A potent greenhouse gas identified in the atmosphere: SF₅CF₃. Science, 289: 611—613
- Timmermann A, Latif M, Voss R *et al*, 1998. Northern hemispheric interdecadal variability: a coupled air-sea mode. J Climate, 11: 1906—1931
- Wunsch C, 2002. What is the thermohaline circulation? Science, 298: 1179—1181

ANALYSIS ON MIXED LAYER DEPTH IN ATLANTIC THERMOHALINE-CIRCULATION DOWN-WELLING AREA IN DIFFERENT RADIATIVE FORCING SCENARIOS

LI Jing-Nan, CHEN Xue-En

(College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract Based on four radiative forcing scenarios from IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), we used the ECHAM5/MPI-OM model's outputs (monthly data time from 1850 to 2300), including monthly mixed layer depth data, sea surface data, and sea surface salinity data, to analyze the variability of mixed layer depth in thermohaline circulation (THC) down-welling area. The result shows that along with the radiative forcing rises, the mixed layer depth declined in both down-welling areas, the oscillation period of mixed layer depth declines in Greenland Sea – Iceland Sea – Norwegian Sea area (GIN) when the radiative forcing climbs, which does not occurs in Labrador Sea (LAB) area. The LAB area is more sensitive to the radiative forcing change than the GIN area. In both GIN and LAB areas, the impact of sea surface temperature on mixed layer depth is long-lasting and response of mixed layer depth to sea surface salinity change is prompt. The main factor for inducing variability of mixed layer depth in LAB area is salinity, while in GIN area, it depends on radiative forcing scenarios.

Key words radiative forcing; mixed layer; THC (thermohaline circulation); Rcps (representative concentration pathways); atmosphere-ocean coupled model