

卑尔根气候模式中大西洋热盐环流 年代际与年际变率的气候影响

周天军¹ Helge DRANGE²

1 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen, Norway

摘 要 利用一个全球海气耦合模式——卑尔根气候模式的积分结果, 揭示了与大西洋热盐环流(THC)年代际和年际振荡相对应的气候异常型。年代际振荡发生在全海盆尺度, 伴有亚速尔高压的增强、冰岛低压的加深; 年际振荡发生在局地尺度, 伴有亚速尔高压的减弱。这两种海平面气压异常型都反映了北大西洋涛动(NAO)活动中心的强度变化, 两种变率型对应的拉布拉多海对流活动都加剧。但伴随局地尺度的 THC 调整, 伊尔明格海的对流活动减弱。蒸发异常对拉布拉多海表层盐度异常的影响较为显著。分析表明, 局地尺度的 THC 振荡主要是对大气强迫的被动响应, 而海盆尺度 THC 振荡的实质是反映整个输送带的强度变化, 其气候意义要大于 THC 的局地振荡。

关键词 热盐环流 北大西洋涛动 年代际变率 年际变率

文章编号 1006-9895(2005)02-0167-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

Climate Impacts of the Decadal and Interannual Variability of the Atlantic Thermohaline Circulation in Bergen Climate Model

ZHOU Tian-Jun¹ and Helge DRANGE²

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen, Norway

Abstract Climate impacts of the basin-scale and local-scale oscillations of the Atlantic thermohaline circulation(THC) are identified by using Bergen Climate Model(BCM). The basin-wide oscillation occurs at decadal scales with strong cross-equatorial flow, the more localized fluctuation of the THC occurs mainly at interannual scales with weaker cross-equatorial flow. The basin-wide THC oscillation is associated with an intensified Azores high and Icelandic low, the local-scale THC adjustment is accompanied with a negative phase-like North Atlantic Oscillation(NAO). The atmospheric circulation change results in an intensified deep convection in the Labrador Sea in both cases. For the local-scale THC adjustment, the Irminger Sea is dominated by a weakened convection. Surface salinity anomalies in the Labrador Sea are created locally by evaporation anomalies at the sinking regions. Further analyses support that the local-scale THC oscillation is caused passively by the atmosphere forcing. There are evidences indicating that the whole THC conveyor accelerating generates the warmer sub-polar SST, which warms the air and enhances the surface evaporation.

Key words thermohaline circulation, North Atlantic oscillation, decadal and interannual variability modes

1 引言

全球大洋环流系统的一个重要组成部分, 是所谓的

“大西洋热盐环流输送带(简称 THC)”。它包括暖而咸的热带、副热带表层水的北向输送以及冷的北大西洋深层水的南传, 整体上构成一强劲的“经圈翻转环流”。该

收稿日期 2003-10-26 收到, 2004-03-11 收到修定稿

基金项目 国家自然科学基金资助项目 40005004、40375029, 中国科学院创新项目 ZKCX2-SW-210 和国家重点基础研究发展规划项目 G200007850-2

作者简介 周天军, 男, 1969 年出生, 博士, 研究员, 主要从事海气耦合模式的研制与应用、海气相互作用和气候变率研究。E-mail: zhou tj@lasg.iap.ac.cn

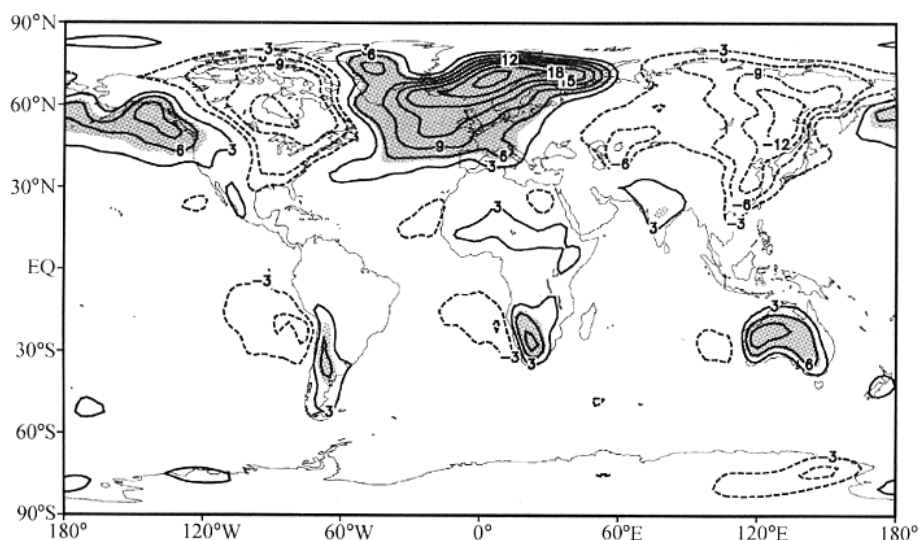


图1 冬季平均表层气温(单位: $^{\circ}\text{C}$)相对于纬向平均值的偏差分布(根据 NCEP 再分析资料 1958~1996 年的平均值绘制),等值线间隔为 3,零线被略去,阴影区表示偏差大于 5°C

Fig. 1 Departure of climatological wintertime (DJF) surface air temperature from the zonal mean condition (units: $^{\circ}\text{C}$). The data is taken from the NCEP/NCAR reanalysis covering 1958–1996. Contour interval is 3, and zero line is omitted. Values greater than 5°C are shaded

洋流系统能够将大量的热量自热带输送到北大西洋高纬地区^[1]。在冬季,这些热量被释放给位于大洋之上、东移的大气,从而极大地改变了北欧地区的冬季气温。比较全球大洋的表层海温分布,大西洋和太平洋之间最为显著的差异位于北半球高纬地区,北大西洋较之同纬度的北太平洋要温暖得多。北大西洋的这一暖海温,使得北欧气候较之同纬度的其他地区要温和得多。换言之,如果英国位于北太平洋的东岸,其气候就要冷得多。如图1所示,冬季北欧地区的近地层温度,较之同纬度的其他地区最多要高十多度。因此,THC 强度的变化对于北大西洋地区的气候至关重要,它被认为是气候变化问题所带给人类的主要挑战之一^[2]。

研究热盐环流为什么要强调大西洋?尽管太平洋和大西洋在其各自的西边界都有很强的北向表层流,即黑潮和湾流,但是它们在高纬海域差别很大。太平洋黑潮向北延伸不远,并且其南向回流发生在近表层。在北大西洋,湾流的北向伸展很远,在高纬海域,海水首先下沉到较深的深度上,随后再转而南流。现有的水文观测资料可以清楚地揭示出这种环流差异。北大西洋表层净向北的表层流强度超过 $16.0 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,通过冷却作用,它在高纬度下沉、转变为深层水团。与大西洋相反,太平洋的净北向输送几乎为零,原因就在于北向的黑潮表层流,随后是在接近大洋表层处返回赤道的。因此,研究大洋经向翻转环流偏重大西洋有其道理。

在中国研究热盐环流也有其现实意义。尽管目前的器测资料尚不足以提供热盐环流影响东亚气候的确

凿证据,但来自古气候领域的研究进展显示,东亚气候的变化与北大西洋地区存在很强的一致性。格陵兰冰芯资料表明,“新仙女木期”持续 1150~1300 a,然后在大约 10 a 之内突然结束。关于“新仙女木”事件究竟局限于大西洋区域还是全球现象的讨论,曾经多有争议,从南海冰后期的古温度记录看,至少相邻的苏禄海已经有 3 个站位发现有新仙女木事件。南海北部大约在 11000 a 前开始出现气候短期旋回,表现为冬季海温下降 2.7°C 。新仙女木期的气候旋回,在南海北部主要涉及表层海水。南海南部也发现新仙女木信号,只是与南海北部相比,变化幅度较小^[3]。格陵兰冰帽冰芯的氧同位素曲线揭示,末次冰期旋回中存在一系列快速的升温事件(Dansgaard-Oeschger 事件,简称 D-O 事件),每一个 D-O 旋回事件持续时间为 500~2000 a 不等,升温幅度达 $5 \sim 8^{\circ}\text{C}$,北大西洋深海沉积物中也发现末次冰期存在多次冰筏碎屑沉积记录(Heinrich 事件,简称 H 事件)。D-O 事件与 H 事件关系密切,每一组 D-O 事件均以突然增暖开始,然后发生逐次降温事件,最后由一个 H 事件结束。中国的黄土研究中发现有 H 事件的记录,末次冰期中国黄土中极大谷粒的年龄,与最后六次 H 事件相吻合,由于中亚风尘的传输和沉降,主要是由东亚冬季风控制的,所以这种关系被解释为源自东亚冬季风的变化^[4]。因此,北大西洋和中国的气候变化,通过西风带的变化联系起来。该结果也表明, H 事件、D-O 事件具有半球性质,与高纬冷空气通过西伯利亚高压对东亚季风的影响有关。

全球变暖形势下北大西洋 THC 的变化为世人所

关注^[2],但是关于 THC 崩溃的可能性发生的几率,我们尚难以给出可靠的判断。回答这一问题,既需要了解驱动快速气候变化的因子,也需要了解气候系统固有的内部变率。目前最为紧迫的任务,是直接测量大西洋翻转环流的强度,这是一富有挑战性的工作,因为目前的海洋观测系统在测站数量、技术上都远不能和大气探测系统相比,海洋观测资料无论在时间上还是在空间上都极度匮乏。因此,现阶段关于 THC 变率的研究工作,在很大程度上要依赖于数值模式^[5-9]。概括而言,此前的研究工作主要围绕着整个大西洋经向海盆范围内的 THC 低频变率(特别是年代际变率)问题^[10,11]、全球增暖对 THC 的冲击等问题来展开的^[12]。把研究重点放在整个洋盆尺度的 THC“输送带”的变率问题,这是一个合理的选择,因为其气候意义更为显著。但是,这不应成为忽视其他时空尺度 THC 变率的理由。有研究表明,THC 还存在着较短时间尺度、较小空间尺度上的振荡^[13-15],但是关于不同空间尺度 THC 振荡的气候影响问题,至今尚讨论不多。本文利用一个全球海气耦合模式的长期积分结果,讨论了与 THC 的年代际和年际变率相联系的气候异常型,指出局地尺度 THC 振荡主要是对大气强迫的被动响应,而海盆尺度 THC 振荡的实质是整个输送带的增强或减弱,它能够作为主动因子,影响 SST 乃至大气的变化,气候意义因而更为显著。本文其他部分安排如下:模式简介见第 2 部分,第 3 部分比较了两种时空尺度的 THC 振荡的特点,第 4 部分是本文的重点,讨论了两种不同时空尺度 THC 振荡的产生机制及其气候影响,第 5 部分是对本文的总结,同时对若干存在的问题进行了讨论。

2 模式概述

本文所用耦合模式为挪威的卑尔根气候(BCM)^[16]。BCM 的海洋模式分量是迈阿密等密度坐标海洋模式 MICOM OGCM,大气模式是 ARPEGE/IFS (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle/Integrated Forecast System) 的 AGCM。海冰模式考虑了热力和动力过程。AGCM 的水平分辨率为 T42,采用简约高斯网格,垂直方向分为 31 层。大气模式预报的径流被交换给海洋模式中沿岸地区的相应网格点。模式处理径流的办法,是利用径流路径指标场将大气模式的每一个陆地点和海洋模式中沿着海岸的径流入海口联系起来。为避免强降雨引起沿海海域的盐度骤然降低,令降水在一定时间后均匀入海。OGCM 采用非均匀网格,并且将模式的北极放在西伯利亚,这样极大地方便了北冰洋的处理。海洋模式的水平分辨率大致是

$2.4^{\circ} \times 2.4^{\circ}$,但在经圈方向上,向赤道逐渐增加到 0.8° 。模式在垂直方向上有 24 层,相对于表层压力,等密度层的范围是 $\sigma = 23.54$ 到 $\sigma = 28.10$ 。为合理地反映海气相互作用过程,便于进行 AGCM 与 OGCM 的耦合,OGCM 在大洋上部引入了一个混合层模式。该耦合模式最近由 BCM 课题组在挪威卑尔根完成了总计 328 年的长期积分^[16],本文取其后面的 160 年进行分析,以克服耦合积分启动之初模式气候调整过程的影响。

在耦合积分过程中,为了克服模式存在的气候漂移问题,根据模式耦合积分前“spin-up”阶段的周平均的热通量和淡水通量,对表层盐度(SSS)和表层海温(SST)进行了通量调整。该模式并非尽善尽美,例如其在热带太平洋的热通量订正最大可以达到 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,即使采用了通量调整技术,其热带大洋的 SST 气候态依然偏冷等^[16]。但是,其对北冰洋、北大西洋高纬地区的细致处理,其耦合过程中对水热平衡的校正,使得该模式非常适合被用来开展与大西洋中高纬气候变率有关的研究。

为便于讨论海气相互作用过程,本文将大气模式和海洋模式输出的所有水平场都插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 分辨率的规则网格上。其中,大气模式资料由简约高斯网格向完全高斯网格的插值利用的是线性插值方案,由高斯网格向经纬网格的转换利用的是 NCEP 再分析的处理方案。海洋模式资料由于是从高分辨率向低分辨率插值,故采用有效半径为 1.5° 的面积加权平均方案。

3 热盐环流的年代际振荡与年际振荡

为揭示 THC 的多时空尺度振荡的主导性模态,对年纬向平均大西洋经圈流函数距平场做经验正交函数(EOF)分解。注意这里的经圈流函数距平是相对于 160 年平均的模式气候态而言的。在进行 EOF 分解以前,对资料进行了去倾(detrending)处理,以克服模式积分过程中的线性漂移趋势影响,这种漂移趋势源自耦合前海洋模式的“spin-up”时间不够长,深海并没有真正达到平衡态。第一个 EOF 模态解释了总方差的 44.4%,为直观显示该模态的空间型,根据其对应的主分量(PC1),对大于一个标准偏差的年份做经圈流函数的距平场合成(图 2a),表现为全海盆范围的距平型,存在很强的跨赤道流动,距平极大值位于 40°N 附近的 2000 ~ 3000 m 左右的深度上。该空间分布和 THC 的平均气候态非常接近^[17],因此它反映的是整个大西洋“输送带”的加速或“刹车”。对应的主分量 PC1 做 Morlet 子波分解^[18](图 2b),主要表现为年代际尺度上的振荡,主导周期为 22 年左右。

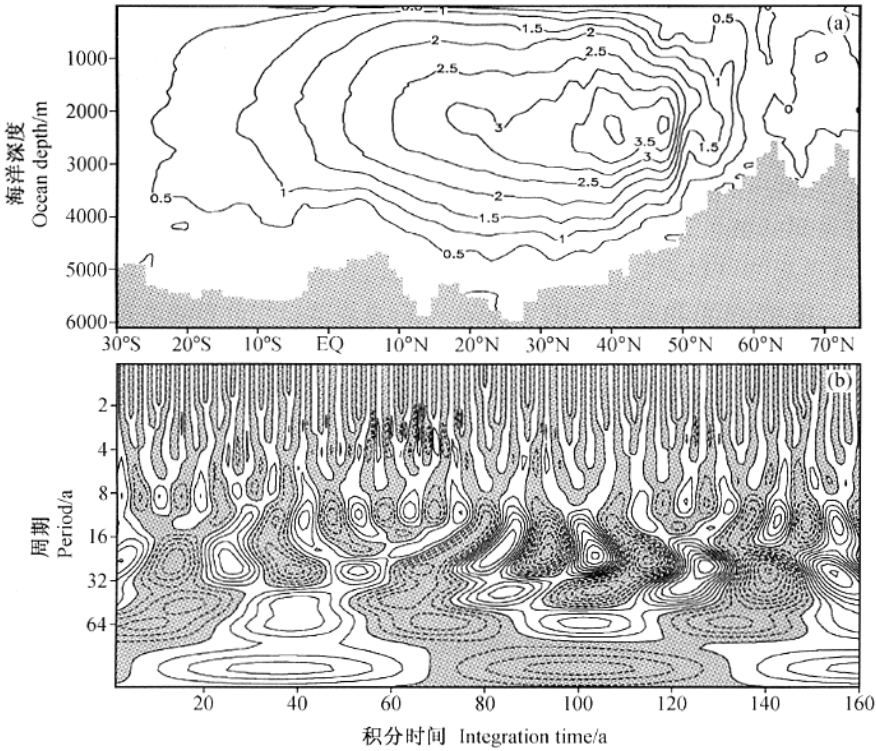


图 2 海盆尺度 THC 变化对应的年均大西洋纬向平均经圈流函数距平的合成分析 (a, 单位: $10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) 及其时间系数的周期分布 (b)
Fig. 2 (a) Composite analysis of the annual Atlantic zonal mean meridional stream function anomaly associated with THC EOF1 with the threshold being one-standard-deviation of the corresponding principal component (units: $10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (b) the Morlet analysis of the corresponding principal component of THC EOF1

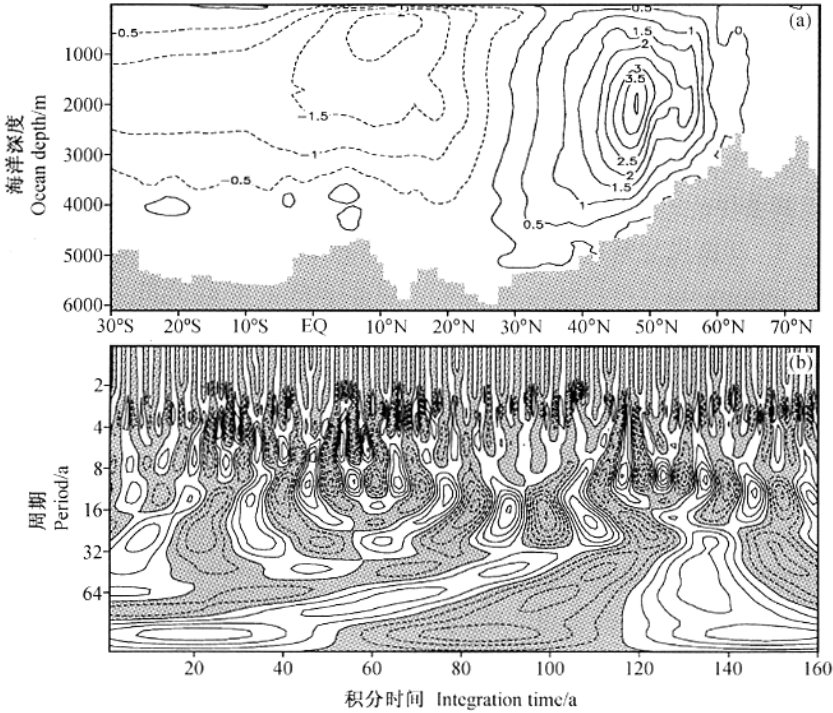


图 3 同图 2 , 但为局地尺度 THC 变化
Fig. 3 Same as Fig. 2 , but for local scale THC change , i.e. THC EOF2

EOF 分解的第二个空间模解释了总方差的 20.1%。根据标准化的主分量 PC2, 以大于一个标准偏差为界, 同样对经圈流函数距平场做合成分析(图 3a), 其形态明显不同于 THC 的气候平均态^[17]。跨赤道流动弱, 距平极大值位于经圈流函数的下沉支, 30°N 以北为正距平, 以南为负距平, 因此反映的是 THC 的局地范围调整。对 PC2 做 Morlet 子波分解(图 3b), 主要表现为年际尺度振荡, 主导性周期为 3 年左右。可见, BCM 中热盐环流的年代际振荡与年际振荡分别表现为整个海盆尺度和局地尺度的变化。

4 海盆尺度、局地尺度 THC 振荡的机制及其气候影响

为进一步揭示与海盆尺度 THC 振荡相关联的大气环流异常和海气界面上的气候要素异常, 把主分量 PC1 分别与冬季平均(定义为前一年度 11 月到本年度 3 月总计 5 个月的平均)的海平面气压(SLP)、混合层深度、表层海温 SST、和表层盐度 SSS 的距平求回归(图 4)。伴随着海盆尺度的 THC 振荡, 北大西洋 SLP

的异常型非常像所谓的“北大西洋涛动(NAO)”的正位相^[19]。同时, 拉布拉多海混合层深度出现正距平, 意味着那里的深对流活动增强。拉布拉多海及其临近海域被 SST 和 SSS 正距平控制。不过, 靠近(45°N, 45°W)处的小面积区域是一个例外, 那里出现负距平, 原因可能是由于模拟的湾流/北大西洋漂流系统的纬向位置的变化引起的^①。

将冬季平均的降水(Rain)、海表蒸发率(Evas)、表层气温(TAS)和表层风场(UVAS)分别与主分量 PC1 求回归(图 5)。拉布拉多海的降水率、蒸发率都出现正异常, 但在量值上蒸发的变化大于降水。正的表层气温异常分布限于湾流区, 和 SST 的变化相似。蒸发异常和 SSS 异常在分布型上的良好匹配关系, 表明 SSS 的变化主要来自蒸发异常的作用(降水异常的作用是相反的, 即令 SSS 变淡)。具体说来, 是表层风速增强(图 5d)和副极地区域 SST 升高(图 4c)共同导致蒸发作用增强。此外, 拉布拉多海的海冰变化不甚明显, 意味着盐析的作用几乎可忽略(图略)。

类似图 4, 与 THC 局地尺度振荡相关联的气候异

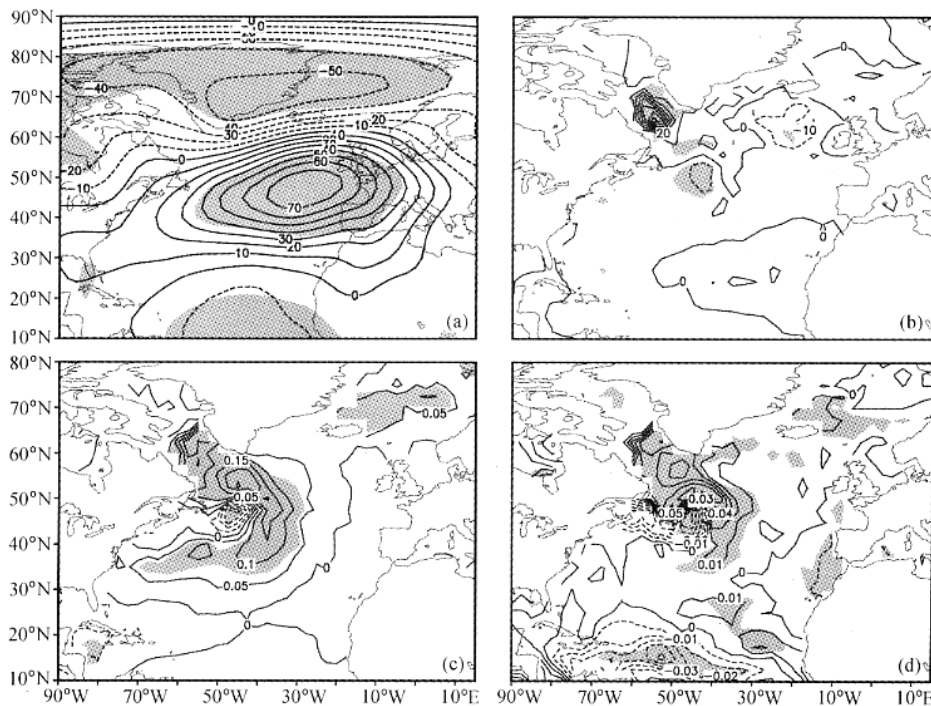


图 4 THC EOF1 的主分量 PC1 与冬季物理量的线性回归系数分布 (a) SLP, 单位: Pa; (b) 混合层深度, 单位: m; (c) SST 距平, 单位: °C; (d) SSS 距平, 单位: PSU (practical salinity unit, 实用盐度单位)。阴影区表示达到 95% 的信度水平, 但图 a 为 90%, 超过 95% 信度的只是 SLP 的距平中心

Fig. 4 Regressions of wintertime anomalies upon the normalized principal component of THC EOF1: (a) SLP (units: Pa); (b) mixed layer depth (units: m); (c) SST (units: °C); (d) SSS (units: PSU). Values of 95% confidence level are shaded except for (a) in which the shaded region is of 90% confidence level

① Bentsen M. 私人通信, 2003

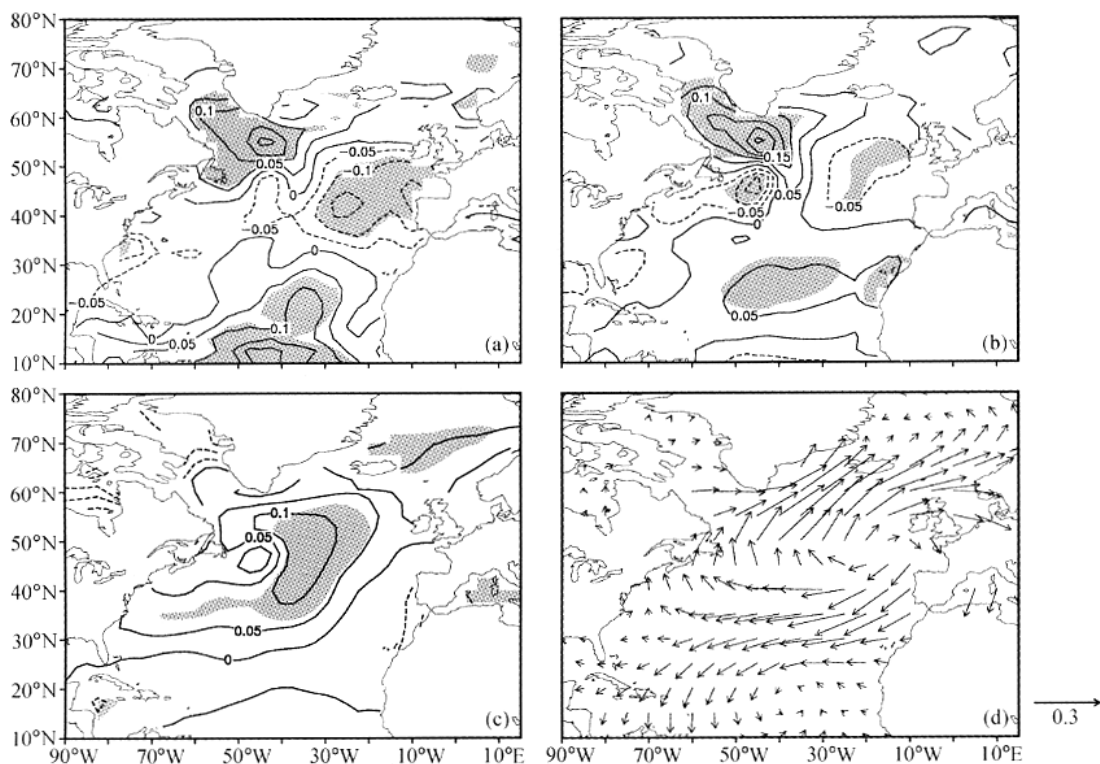


图5 THC EOF1的主分量PC1与冬季物理量距平的线性回归系数分布 (a)冬季降水,单位 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (b)蒸发率,单位 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (c)表层气温,单位 $^{\circ}\text{C}$ (d)风场,单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图a、b和c中的阴影区表示达到95%的信度水平

Fig. 5 Regressions of wintertime anomalies upon the normalized principal component of THC EOF1: (a) Precipitation (units: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$); (b) evaporation (units: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$); (c) surface air temperature (units: $^{\circ}\text{C}$); (d) wind vector (units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Values of 95% confidence level are shaded

常见图6。北大西洋 SLP 同样呈现出类似 NAO 负位相的异常型,较之图4a,NAO型SLP异常的中心位置有所不同。如图6b所示,混合层深度的异常型也和图4b明显不同。尽管拉布拉多海依然为正距平,但是伊尔明格海却为显著的负距平所控制。而且,拉布拉多海的正距平较之图4b要弱。此外,如图6c、d所示,局地尺度THC振荡的SST和SSS异常型,与海盆尺度THC振荡的SST和SSS异常型截然不同。格陵兰岛以南地区出现SST负距平。SSS正距平主要位于拉布拉多半岛东南部海域。

将冬季平均的降水(Rain)、海表蒸发率(Evas)、表层气温(TAS)和表层风场(UVAS)异常分别与主分量PC2求回归(图7)。伊尔明格海(Irminger Sea)附近的蒸发和降水都减少,但在数量上蒸发率的变化大于降水。注意环流的变化(图7d)和图5d有所不同,图5d中最显著的风场变化是从伊尔明格海、冰岛海域到挪威海出现源自较低纬度的西南风异常,而图7d中风场的显著变化是 50°N 附近的东风异常。注意伊尔明格海对流活动的减弱,使得尽管拉布拉多海的对流活动依然增强,但是THC的变化仅限于局地尺度(而不是整个海盆尺度)。换言之,拉布拉多海和伊尔明格海的

对流活动同时增强,是保证整个THC输送带增强的必要条件。

由图4a、图6a可见,伴随着海盆尺度和局地尺度的THC振荡所出现的SLP距平型呈现出类似NAO正、负位相的结构特征。为把上述SLP距平型和“标准的”模式NAO型做一个比较,图8a给出北大西洋冬季SLP的第一个EOF模态,它解释了总方差的23.9%。从空间结构上看,模拟结果都很接近基于观测资料的结果^[20]。SLP EOF1的主分量(即NAO指数)和混合层深度、SST、SSS距平的回归系数分布(图8b~d)如图8b所示,由NAO强迫产生的、三核型的SST距平分布同样和观测非常一致^[21~23]。将图4a、图6a与图8a进行比较发现,尽管图4a、图6a都与NAO型类似(只是位相不同),但是它们与标准的NAO型依然有所区别,即大气活动中心彼此间并非严格对应。图4a中的正距平限于 30°N 以北、 70°W 以东的区域,伴有副高的增强。冰岛附近的SLP负距平反映的是冰岛低压的加深。因此,图4a所反映的距平型类似增强的NAO正位相。图6a中的正距平中心靠近 60°N 、 50°N 以南的海洋区域为负距平,这种距平型有些类似NAO活动的负位相,但并非严格对应,与图8a所示的NAO活动中

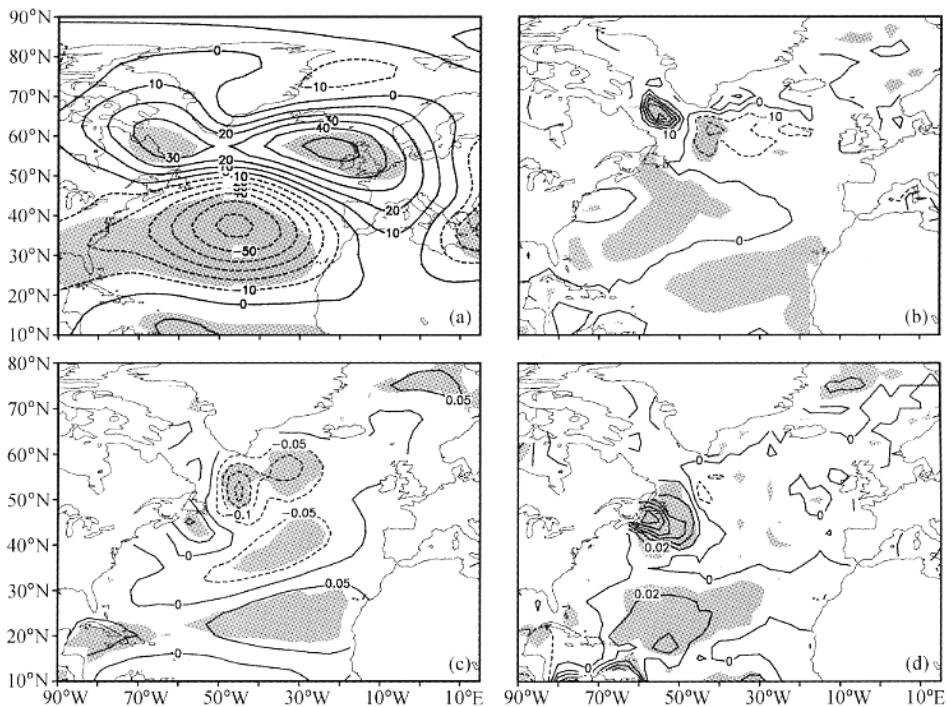


图 6 THC EOF2 的主分量 PC2 与冬季物理量的线性回归系数分布 (a) SLP ,单位 :Pa (b)混合层深度 ,单位 :m (c) SST 距平 ,单位 : $^{\circ}\text{C}$; (d) SSS 距平 ,单位 :PSU (practical salinity unit ,实用盐度单位)。阴影区表示达到了 95% 的信度水平

Fig. 6 Regressions of wintertime anomalies upon the normalized principal component PC2 of THC EOF2 : (a) SLP (units : Pa) ; (b) mixed layer depth (unit : m) ; (c) SST (units : $^{\circ}\text{C}$) ; and (d) SSS (units : PSU). Values of 95% confidence level are shaded

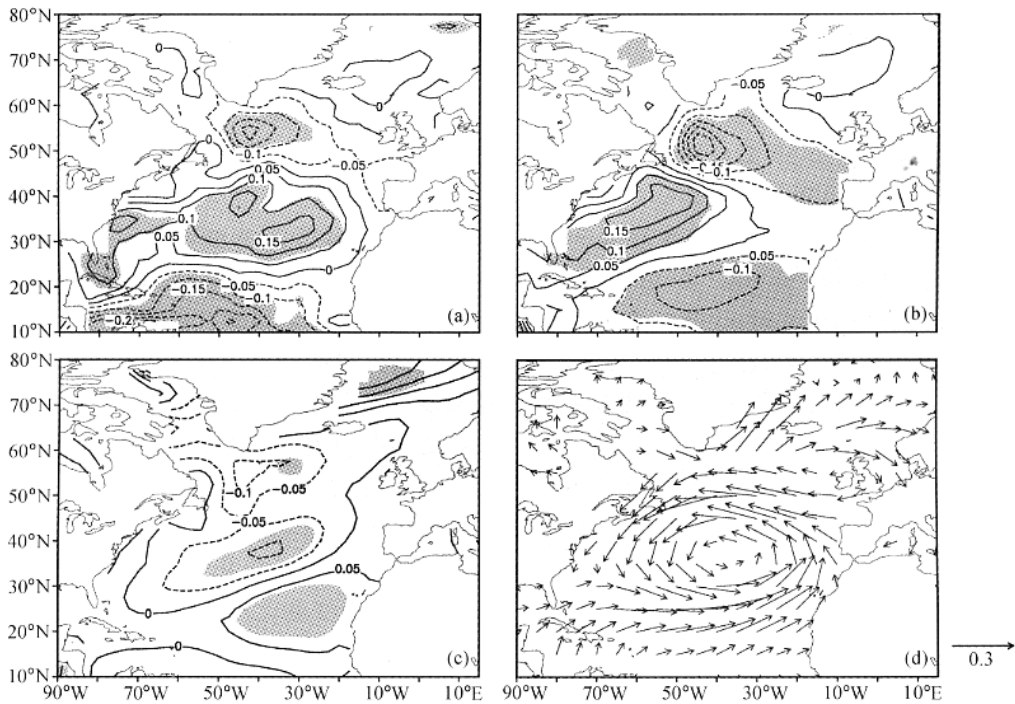


图 7 THC EOF2 的主分量 PC2 与冬季物理量距平的线性回归系数分布 (a) 冬季降水 ,单位 : $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (b) 蒸发率 ,单位 : $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (c) 表层气温 ,单位 : $^{\circ}\text{C}$ (d) 风场 ,单位 : $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 a , b 和 c 中的阴影区表示达到 95% 的信度水平

Fig. 7 Regressions of wintertime anomalies upon the normalized principal component PC2 of THC EOF2 : (a) Precipitation (units : $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) ; (b) evaporation (units : $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) ; (c) surface air temperature (units : $^{\circ}\text{C}$) ; (d) wind vector (units : $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Values of 95% confidence level are shaded

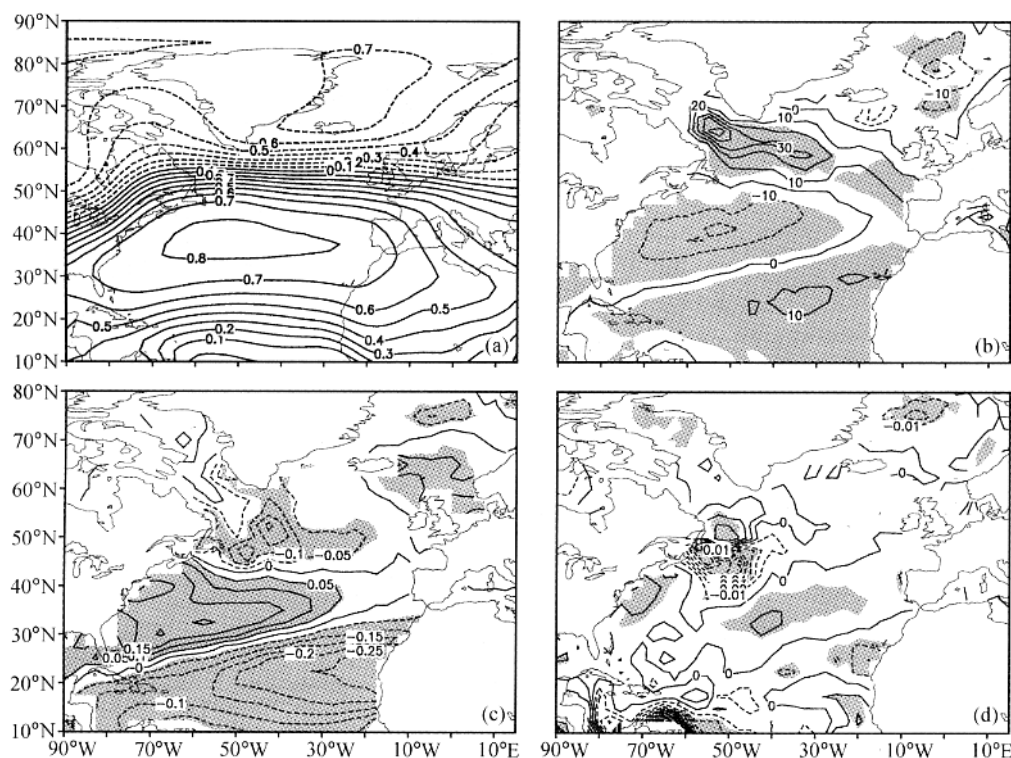


图 8 冬季 SLP 的第一个 EOF 模态 (a); 主分量 PC1 与冬季有关物理量距平的线性回归系数分布 (b) 混合层深度, 单位: m (c) SST, 单位: °C (d) SSS, 单位: PSU。阴影区表示达到 95% 的信度水平。

Fig. 8 (a) EOF1 of wintertime SLP anomalies; (b, c, d) regressions of wintertime anomalies upon the normalized principal component of THC EOF1: (b) mixed layer depth (units: m); (c) SST (units: °C); (d) SSS (units: PSU). Values of 95% confidence level are shaded

心相比, 正距平的位置有些偏南, 冰岛以北的弱的负距平中心也和 NAO 负位相不吻合。

将冬季平均的降水率 (Rain)、海表蒸发率 (Evas)、表层气温 (TAS) 和表层风场 (UVAS) 异常分别与 SLP EOF1 的主分量求回归 (图 9)。NAO 对海气界面物理量的影响在图 8、图 9 中表现得很明显。降水异常在经向呈“+ - +”的三核型。混合层深度与 NAO 活动的位相密切相关。伴随着 NAO 活动的正位相, 拉布拉多海上空寒冷的西北风增强 (图 9d), 大洋表面的热量散失增多, 表层海水变冷 (图 8c), 令对流活动增强, 混合层深度增大 (图 8b)。上述模式结果和观测非常一致^[24]。此外, 注意拉布拉多海和格陵兰海的混合层深度的反位相变化, 这一点在观测资料中已经得到证实^[24]。此外, 如图 9b~d 所示, 拉布拉多海和伊尔明格海的正的蒸发异常, 主要来自纬向风的增强和海气温差的加大。NAO 活动的正位相, 伴有拉布拉多海和伊尔明格海 SST 降低 (图 8c)、表层气温变冷 (图略)。图 9c 中正的海气温差, 意味着表层气温的变冷幅度要大于 SST, 换言之, SST 依然高于表层气温, 这有利于蒸发的增强, 同时也表明蒸发异常主要是大气强迫所致。

需要指出的是, 图 4c 中的 SST 距平分布和图 8c

明显不同。与 NAO 相联系的 SST 距平型呈“三核”结构, 其中副极地涡旋区域为负距平, 而图 4c 中的副极地涡旋区则被正距平所控制, 这意味着它本质上是 THC 变化的结果, 而不是相反。

由图 6 可知, 对于局地尺度的 THC 振荡而言, 拉布拉多海的对流活动也增强, 这一点和海盆尺度的 THC 振荡相同。但是, 对于伊尔明格海而言, 其混合层深度出现负距平。格陵兰岛以南的 SST 负距平是风场变化直接强迫的结果。受大气环流变化的影响, 拉布拉多以东出现很强的 SSS 正距平, 这一特征和 NAO 负位相的情况相吻合。拉布拉多半岛以东海域的盐度变化对 NAO 活动非常敏感, NAO 活动的正位相常伴有负的盐度距平。将 (46.22°N, 47.17°W) 处海洋观测站观测到的海温和盐度变化^[25]和 Jones 等的 NAO 指数序列^[26]比较, 盐度变化与 NAO 指数的反位相关系非常明显。20 世纪 70 年代的 NAO 正位相, 伴有负的盐度距平, 而 1965 年前后的 NAO 活动负位相, 则伴有正的盐度距平。海温变化与 NAO 位相之间的关系同样很明显。可见, 图 8d 所示 BCM 中表层盐度变化与 NAO 的联系, 的确有其观测依据。因此, 是大气环流的变化产生盐度异常, 后者再影响到 THC 的局地调整。

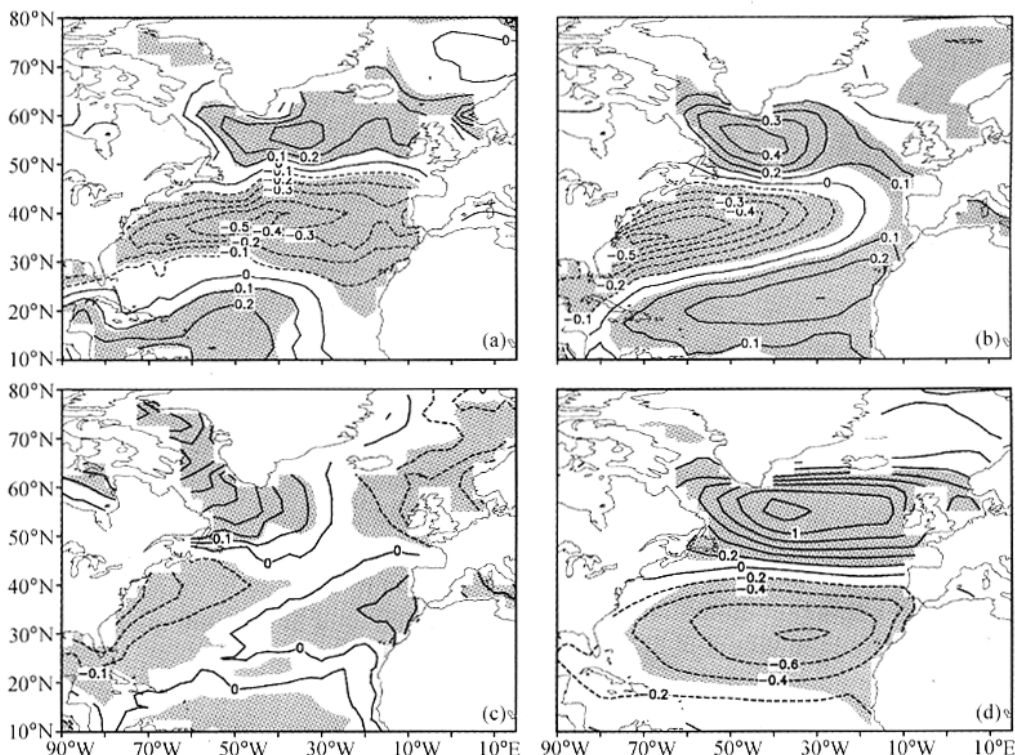


图9 SLP EOF1的主分量PC1与冬季物理量距平的回归系数分布 (a)降水,单位: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (b)表层蒸发率,单位: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (c)海气温差,单位: $^{\circ}\text{C}$ (d)纬向风,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。阴影区表示达到95%的信度水平

Fig. 9 Regressions of the normalized principal component of SLP EOF1 upon the wintertime anomalies : (a) Precipitation (units : $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$); (b) evaporation (units : $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$); (c) air-sea temperature difference (units : $^{\circ}\text{C}$); (d) zonal wind , (unit : $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

5 总结与讨论

5.1 主要结论

利用一个全球海气耦合模式的160年积分结果,揭示了大西洋热盐环流的年代际和年际振荡特征,前者表现为整个大西洋海盆尺度内的经圈流函数变化、后者表现为THC的局地变化。与两种尺度的THC振荡相对应的SLP距平场呈现出类似NAO正、负位相的特征(但活动中心并非严格对应),同时,拉布拉多海的对流活动增强。不同之处在于伊尔明格海,伴随着全海盆尺度的THC振荡,伊尔明格海出现盐度正距平,部分区域对流增强;伴随局地尺度的THC振荡,伊尔明格海盐度则为负距平,对流活动减弱,同时,拉布拉多半岛东南方向大洋有正的SSS距平出现。伴随着海盆尺度的THC振荡在拉布拉多和伊尔明格海所出现的SSS正距平,主要是局地蒸发增强的结果,降水的作用是降低(而不是增加)海表盐度。

伴随海盆尺度的THC振荡所出现的SST距平,与局地尺度THC振荡对应的SST距平型不同。后者是大气直接强迫的结果,在格陵兰岛以南为负距平。前者的分布型是,包括拉布拉多海和湾流区在内的北大

西洋区域都表现为正距平。该形势和NAO强迫的结果差别甚大,表明它是THC变换导致的结果,而不是相反。

综上所述,THC的局地调整,主要表现为海洋对大气强迫的被动响应。在伊尔明格海,这种响应具体表现为大气环流的变化使那里的SST变冷,蒸发减弱,对流减弱;对于拉布拉多海,则是冷空气活动增强,对流活动增强。拉布拉多半岛西南部大洋的盐度变化也较为重要。海盆尺度的THC振荡更多地表现为一种海气耦合模态,THC增强,令拉布拉多和湾流区的SST升高,表层气温变暖,蒸发增强,海表盐度增加,对流活动加强。

5.2 讨论

本文关于海盆尺度THC振荡与SLP、SST和SSS关系的分析结果,与Timmermann等^[6]的结论是一致的,他们利用ECHAM3/LSG耦合模式的700年积分结果,将带通滤波后的THC指数与SLP等气候变量求回归,其THC指数被定义为大西洋经圈流函数的极大值,带通滤波保留了25~45a的周期。他们认为中纬度的SST正距平是导致NAO增强的因素,这对热盐环流变化提供了一个负反馈。尽管关于中纬度SST异常对大

气的反馈作用依然是一个颇有争议的问题^[27~29],本文亦不宜在此做过多讨论,但本文结果与 Timmermann 等^[6]一致之处在于,热盐环流与大气的耦合作用是大西洋地区年代际气候变率的重要组成部分。而且,本文较之前人的一个重要结果是,在北大西洋地区的年际气候变率中,依然可以发现 THC 的变化,具体表现为类似 NAO 异常的大气强迫导致 THC 的局地调整。此外,如果说 SST 强迫大气是热带海气相互作用的主要方式,在中高纬度,这并不是唯一的一种海洋过程影响大气活动的途径,一个不争的事实是,冷、暖水团的转换所造成的极向热输送对北欧地区气候的影响是非常显著的^[1,28],这种影响从本文图 1 可见一斑,对流活动也是海洋向大气释放热量的有效途径,北大西洋地区的气候变率有很大一部分是由高纬度海域的对流活动变化引起的^[30~32]。因此,不能因为大气对中高纬度 SST 异常的响应不像在热带那样强烈而怀疑海气耦合模态的存在。

最后需要指出的是,受器测(instrumental)资料的匮乏所限,现实中的 THC 年代际振荡的特征到底如何,目前尚不得而知,而利用耦合模式所反映的一些特点,可能在很大程度上因模式而异。例如,在 ECHAM/LSG 和 GFDL 的海气耦合模式中,伴随着 THC 的年代际振荡跨赤道海流所发生的相应变化,就不像 BCM 结果那样强劲,它们主要表现为局地尺度的平流模态^[14]。而且,GFDL 模式中流函数的年代际振荡主要发生在北大西洋的北部^[13],其特征和 BCM 中 THC 的局地尺度振荡非常相似。因此,THC 可能存在着多空间尺度的变率。这提醒我们在重点关注经圈流函数极大值变化的同时,亦应注意这种变化的空间特征。经圈流函数极大值的强度变化,可能是整个海盆尺度的,反映了整个“输送带”的加速或“刹车”,但也可能是局地尺度的,反映的只是“输送带”某一部分的变化。就气候意义而言,显然前者的影响范围要更大一些。进一步探讨全海盆尺度 THC 振荡以及局地尺度 THC 振荡与大气的耦合作用,对于了解热盐环流在北大西洋区域乃至北半球气候变率中的作用,是很有必要的。

致谢 本文主要工作系作者在挪威“南森环境与遥感研究中心(NERSC)”访问期间完成。作者感谢 Christopher Torrence 博士提供子波分解程序。

参考文献

- [1] Ganachaud A, Wunsch C. Improved estimates of global ocean circulation, heat transport and mixing from hydrographic data. *Nature*, 2000, **408**(23): 453 ~ 457
- [2] Broecker W S. Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: Will man-made CO₂ upset the current balance? *Science*, 1997, **278**(28): 1582 ~ 1588
- [3] 汪品先. 十五万年来的南海. 上海: 同济大学出版社, 1995, 61 ~ 65
Wang Pinxian. *South China Sea in the Past 150 Thousands Years* (in Chinese). Shanghai: Tongji University Press, 1995, 61 ~ 65
- [4] Stephen C P, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 1995, **375**: 305 ~ 308
- [5] Delworth T, Manabe S, Stouffer R J. Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate*, 1993, **6**: 1993 ~ 2011
- [6] Timmermann A, Latif M, Voss R, et al. Northern Hemispheric interdecadal variability: A coupled air-sea mode. *J. Climate*, 1998, **11**: 1906 ~ 1931
- [7] Delworth T, Greatbatch R. Multidecadal thermohaline circulation variability driven by atmospheric surface flux forcing. *J. Climate*, 2000, **13**: 1481 ~ 1495
- [8] 周天军, 张学洪, 王绍武. 大洋温盐环流与气候变率的关系研究. 科学通报, 2000, **45**(4): 421 ~ 425
Zhou Tianjun, Zhang Xuehong, Wang Shaowu. The relationship between the thermohaline circulation and North Atlantic Oscillation. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2000, **45**(11): 1052 ~ 1056
- [9] Cheng W, Bleck R, Rooth C. Multi-decadal thermohaline variability in an ocean-atmosphere general circulation model. *Climate Dyn.*, 2004, **22**: 573 ~ 590
- [10] 周天军, 王绍武, 张学洪. 大洋温盐环流的稳定性及变率模拟研究进展. 地球科学进展, 1998, **4**: 334 ~ 343
Zhou Tianjun, Wang Shaowu, Zhang Xuehong. Proceeding of modeling studies on the stability and variability of the thermohaline circulation. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1998, **4**: 334 ~ 343
- [11] 周天军, 王绍武, 张学洪. 大洋温盐环流与气候变率的关系研究: 科学界的一个新课题. 地球科学进展, 2000, **15**(6): 654 ~ 660
Zhou Tianjun, Wang Shaowu, Zhang Xuehong. Comments on the role of the thermohaline circulation in global climate system. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2000, **15**(6): 654 ~ 660
- [12] Stocker T F, Clarke G K C, Le Treut H, et al. Physical climate processes and feedbacks. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution to Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001, 439 ~ 441
- [13] Griffies S M, Bryan K. A predictability study of simulated North Atlantic multidecadal variability. *Climate Dyn.*, 1997, **13**: 459 ~ 487
- [14] Rahmstorf S. Decadal variability of the thermohaline circulation. *Beyond El Niño: Decadal and Interdecadal Climate Variability*. Navarra A, Ed. Springer, 1999, 309 ~ 332
- [15] 周天军. 大洋经向翻转环流的多空间尺度变率. 科学通报, 2003, **48**(增刊 2): 49 ~ 54
Zhou Tianjun. Multi-spatial variability modes of the Atlantic meridional overturning circulation. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2003, **48**

(Supp. II) : 30 ~ 35

[16] Furevik T , Bentsen M , Drange H , et al. Description and evaluation of the bergen climate model : ARPEGE coupled with MICOM. *Climate Dyn.* , 2003 , **21** (1) : 27 ~ 51

[17] 周天军. 全球海气耦合模式中热盐环流对大气强迫的响应. *气象学报* 2003 , **61** (2) : 164 ~ 179
Zhou Tianjun. Adjustment of the North Atlantic thermohaline circulation to the atmospheric forcing in a global air-sea coupled model. *Acta Meteorologica Sinica*(in Chinese) , 2003 , **61** (2) : 164 ~ 179

[18] <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>

[19] Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation : Regional temperatures and precipitation. *Science* , 1995 , **269** : 676 ~ 679

[20] <http://www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.html>

[21] Wallace J M , Smith C , Jiang Q. Spatial patterns of atmosphere-ocean interactions in the northern winter. *J. Climate* , 1990 , **3** : 990 ~ 998

[22] Delworth T. North Atlantic interannual variability in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate* . 1996 , **9** : 2356 ~ 2375

[23] Zhou T J , Zhang X H , Yu Y Q , et al. The North Atlantic Oscillation simulated by Versions 2 and 4 of IAP/LASG GOALS model. *Adv. Atmos. Sci.* , 2000 , **17** : 601 ~ 616

[24] Dickson R R , Lazier J , Meincke J , et al. Long-term coordinated changes in the convective activity of the North Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.* , 1996 , **38** : 241 ~ 295

[25] <http://www.mar.dfo-mpo.gc.ca/science/ocean/woce/newfbas/nwa-poster-contents.html#part3>

[26] Jones P D , Jonsson T , Wheeler D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.* , 1997 , **17** : 1433 ~ 1450

[27] Frankignoul C. Sea surface temperature anomalies , planetary waves , and air-sea feedback in the middle latitudes. *Rev. Geophys.* , 1985 , **23** (4) : 357 ~ 390

[28] Visbeck M. The ocean 's role in Atlantic climate variability. *Science* , 2002 , **297** (27) : 2223 ~ 2224

[29] Peng S L , Robinson W A , Li S L. Mechanisms for the NAO responses to the North Atlantic SST tripole. *J. Climate* , 2003 , **16** : 1987 ~ 2004

[30] Rahmstorf S. Multiple convection patterns and thermohaline flow in an idealized OGCM. *J. Climate* , 1995 , **8** : 3028 ~ 3039

[31] Rahmstorf S. A simple model of seasonal open ocean convection , Part I : Theory. *Climate Dyn.* , 2001 , **52** : 26 ~ 35

[32] Kuhlbrodt T , Titz S , Feudel U , et al. A simple model of seasonal open ocean convection , Part II : Labrador Sea stability and stochastic forcing. *Climate Dyn.* , 2001 , **52** : 36 ~ 49