

# 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\*

黄建斌<sup>1\*\*</sup> 周天军<sup>2</sup> 朱锦红<sup>1</sup> 王绍武<sup>1</sup>

1. 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

**摘要** THC(热盐环流)的变化对全球气候的影响在大西洋地区最为显著. Manabe 利用淡水强迫 THC 引起海温变化的信号也主要集中在大西洋, 并呈 dipole(耦极)模态分布. 文中根据 Manabe 淡水强迫 THC 实验结果, 给定北大西洋冷, 南大西洋暖的海温距平分布代表弱 THC, 以相反海温距平分布代表强 THC, 利用大西洋这两种异常海温来驱动大气环流模式, 研究这两种海温异常分布所代表的 THC 强弱变化对大西洋沿岸气候的影响, 并且选出 5 个降水对 THC 变化敏感的地区, 利用这些地区观测的降水资料拟合一个反映 THC 强弱变化的综合指数 THCI, 该综合指数能有效反映近 100 年 THC 变化的主要特征.

**关键词** 热盐环流 模式诊断 大西洋 海温异常

THC(热盐环流)是全球性大洋深层环流, 其将低纬盈余热量向高纬输送, 对全球能量平衡起到重要作用, 当今 THC 主要集中在大西洋地区, 表现为 MOC(垂直经向翻滚流)<sup>[1-3]</sup>. 由于 THC 对全球能量平衡的重要性, 其稳定性及变率对区域及全球气候有重要影响<sup>[4]</sup>. 格陵兰冰芯及深海沉积显示气候存在千年尺度的冷暖循环(D/O 振荡). 研究认为 THC 千年尺度的变率不仅可能是引起 D/O 振荡的原因<sup>[3,5]</sup>, 而且对人类文明进程有着重大影响<sup>[6,7]</sup>; THC 的关闭甚至能引起气候突变. 如发生在上次冰期末的新仙女木事件(Younger Drays)<sup>[3,8,9]</sup>; 美国国防部“秘密报告”也指出全球变暖愈演愈烈, 将导致 THC 的崩溃, 从而引起灾难性的气候突变<sup>[10]</sup>. 鉴于 THC 的重要性, 其变化及影响仍是当今气候研究中的重要问题.

过去人们主要关注 THC 千年尺度变化<sup>[3,5]</sup>, 最近通过代用资料和模式研究发现 THC 也存在明显的多/年代际尺度变率<sup>[11-15]</sup>. Delworth<sup>[11]</sup> 研究发现

南北大西洋海温的 dipole(耦极)模态可能与 THC 多/年代际尺度变率相关, 以前的研究也显示这种海温异常和大西洋地区气候的多/年代际尺度变化紧密联系<sup>[16-20]</sup>. 如 Sahel(萨赫勒)的干旱<sup>[21-24]</sup>, 巴西东北部的降水<sup>[25]</sup>; 北美气候及河流流量<sup>[26-28]</sup>, 大西洋飓风的发生频率<sup>[29]</sup>, 欧洲的气候变化<sup>[30,31]</sup>. 而 Manabe<sup>[32]</sup> 利用淡水强迫 THC 发现全球海温变化信号主要集中在大西洋地区, 并且呈 dipole 模态分布(北大西洋冷, 南大西洋暖), 也与 Delworth 的研究结果一致. 因此研究与 THC 相关的大西洋海温 dipole 模态对气候的影响具有重要意义. 文中利用 Manabe 实验结果, 设计实验, 用与 THC 变化有关的大西洋 dipole 模态海温分布驱动大气模式, 来研究这种海温异常对气候的影响. 考虑到目前对 THC 的研究仍然主要利用代用资料如 SST(海表温度), 本文则通过模拟和观测研究 THC 对大西洋地区气候的影响, 同时反过来利用对 THC 变化敏感地区的观测气候变量重建近百年 THC 变

2007-06-04 收稿, 2007-08-05 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40205011)

\*\* E-mail: hjb@pku.edu.cn

化指数. 研究结果显示该指数能有效地反映近 100 年 THC 变化的主要特征.

### 1 模拟实验和资料

采用大气环流模式 CCM3, 该模式是美国国家大气研究中心 (NCAR) 研制的全球大气环流谱模式, 三角形谱截断, 水平分辨率为 T42, 纬向为均匀分布的 128 个格点, 经向有 64 个 Gauss 格点, 垂直方向用  $\eta$  混合坐标, 从上到下共分 18 层. 时间积分用半隐式方案, 积分步长为 20 min. 模式考虑了包括辐射 (长、短波辐射传输)、云、对流、陆面 (植被、冰雪、土壤水分)、边界层、垂直扩散以及重力波拖曳等各种物理过程. 水汽输送计算用半 Lagrange 方法, 陆面过程用 Land Surface Model (V1.0). 模式具体细节见文献 [33]. CCM3 模式具有较好的气候模拟性能<sup>[34]</sup>, 是世界上广泛应用的气候模式之一.

由于 THC 活动主要集中在大西洋地区, Manabe<sup>[32]</sup> 利用淡水强迫 THC 的实验引起的海温变化也主要集中在大西洋地区, 参照该实验结果, 本文给定弱 THC 对应的大西洋海温距平分布为北大西洋冷, 南大西洋暖; 同时以相反海温距平分布 (北大

西洋暖, 南大西洋冷) 代表强 THC (图 1). 利用以上所给定海温强迫大气环流模式 CCM3, 一共设计了 3 个实验: (i) 利用 1990 年月平均海温强迫 CCM3 作为控制实验; (ii) 在 1990 年月平均海温的基础上, 加上弱 THC 阶段所对应的海温距平分布 (图 1(a)) 强迫 CCM3 作为弱 THC 实验; (iii) 在 1990 年月平均海温的基础上, 加上强 THC 阶段所对应的海温距平分布 (图 1(b)) 作为强 THC 实验. 三个模拟实验各积分 31a, 只分析后 30a, 第 1 年作为模式平衡 (Spin-up) 舍去.

文中所用资料: Hadley Center (哈德莱中心) 的 HadISST 1.1 海温资料<sup>[35]</sup>, 该资料集实测海表面温度 (已订正) 和卫星资料, 为一套分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的月平均网格点资料, 时间从 1870 年到现在, 只采用 1870—2002 年这个时段的数据; 所用降水资料则是英国东安吉利亚大学气候研究单位的 CRU 资料 CRU TS2.1<sup>[36]</sup>, 该资料为覆盖全球陆地的观测格点, 其分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 时间范围为 1901—2002 年, 本文只采用其月平均值. 对观测 CRU TS2.1 和模拟结果都只分析 6—9 四个月的降水资料.

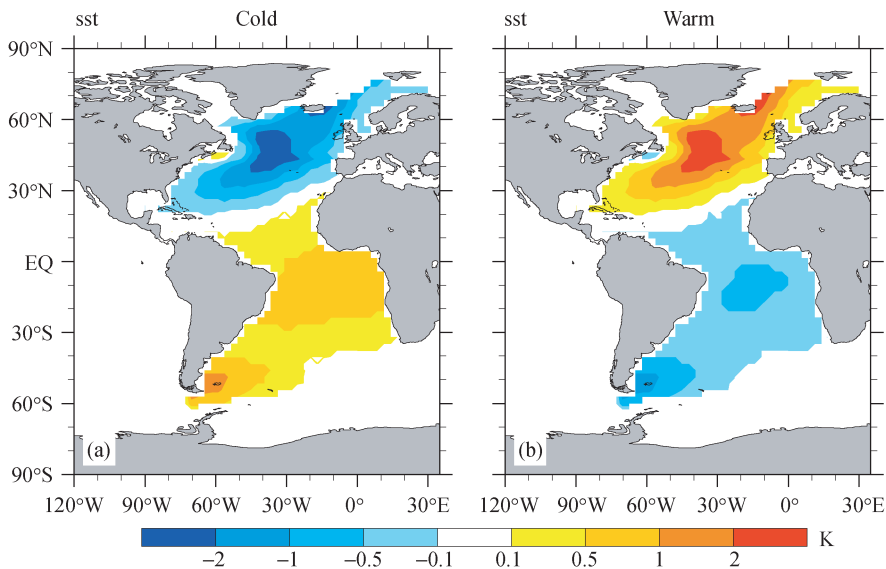


图 1 根据 Manabe 实验<sup>[33]</sup>, 所给定的 THC 活动强、弱阶段所分别对应的大西洋海温距平分布 (a) 弱 THC 阶段对应的大西洋海温距平分布; (b) 强 THC 阶段对应的大西洋海温距平分布

## 2 THC 强弱变化对降水分布的影响

诸多研究发现 Sahel、欧洲、巴西东北部、北美的降水与 THC 活动密切相关<sup>[21-31]</sup>。考虑到 Sahel、欧洲的降水主要集中在 6—9 月, 为了便于分析, 本文主要分析大西洋沿岸 6—9 月的降水对 THC 强弱变化的响应。图 2(a) 给出 THC 强弱变化对大西洋沿岸降水影响的模拟情况。模式结果显示: 当 THC 减弱时, Sahel、西欧和北欧、美国中北部、加拿大中部和北部、南美东北部及南部降水减少; Sahel 以南及中非地区、美国西和南部及墨西哥东部、巴西大部分地区降水增加; 其中 Sahel、中非、英国及西欧、北美西部、美国南部及墨西哥东部、巴西大部分、南美东北和南部降水变化都通过了 90% 的信度检验。从环流场上看, 无论 THC 强弱, 气压基本上以带状分布, 在南北大西洋上各有一高压中心(图 3(a), (b)); 当 THC 弱时(图 3(a)), 北大西洋中纬高压增强, 南大西洋高压相对减弱; 当 THC 强时(图 3(b)), 情况相反。从 850 hPa 风场上看, 当 THC 减弱时, Sahel 地区有

东风距平, 西欧有东北风距平; 美国西南及墨西哥地区有弱的西风距平, 巴西有东南风距平, 中非有弱的东风距平。这样的环流配置有利于中非、巴西东北部、美国西南及墨西哥地区降水增加, Sahel、西欧降水减少。从模拟结果来看, 环流场对 THC 冷暖状态时的海温响应并不对称(图 3(c)), 从降水场上看(图略), THC 强时 Sahel 地区降水比 THC 弱时变化更加明显, 而且降水带比干旱带面积大, 远伸到埃塞俄比亚高原; 加拿大北部在 THC 强、弱时降水都有所减少; 西欧及中欧在 THC 强、弱时降水也都减少, 但是在 THC 弱时, 降水减少更加明显; 北欧在 THC 两种状态下降水都有所增加, 但是在 THC 强时增加更加明显。

过去研究认为, THC 活动减弱时, Sahel 地区干旱<sup>[25]</sup>, 英国及西欧夏季降水减少<sup>[30]</sup>; THC 活动增强时, Sahel 降水增加<sup>[25]</sup>。与我们关于 THC 强弱变化对大西洋沿岸降水影响的研究结果一致, 同时我们还发现 THC 减弱时, 中非、美国西南部到墨西哥东部、巴西东北部的 6—9 月的降水有显著性的增加。

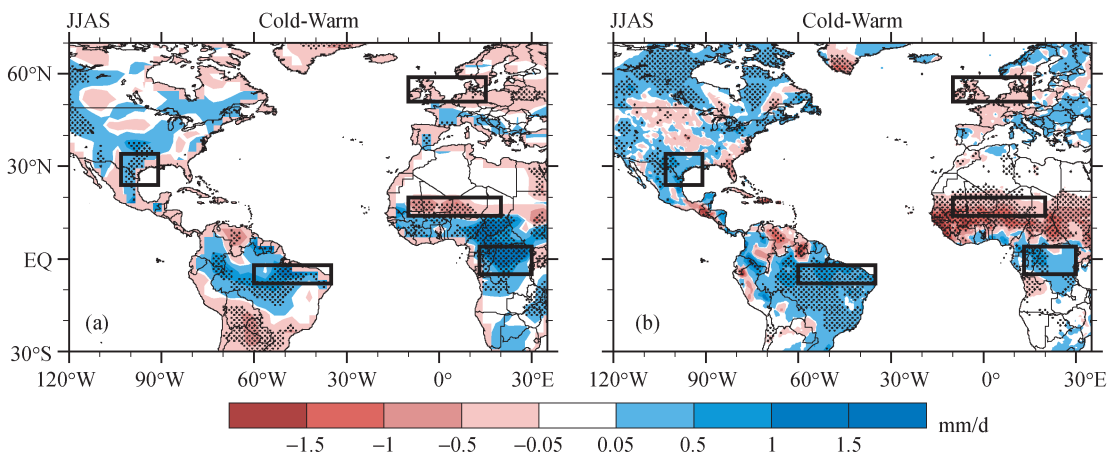


图 2 由于 THC 强、弱变化引起大西洋沿岸降水变化的分布及 5 个降水对 THC 变化敏感的地区  
(a) 模式模拟结果, 弱 THC 阶段(冷阶段)与强 THC 阶段(暖阶段)平均降水之差的合成图; (b) CRU 观测结果, 弱 THC(冷)阶段(1971—1990 年)与强 THC(暖)阶段(1941—1960 年)平均降水之差的合成图; 图中阴影部分表示通过了 90% 的  $t$  检验; 5 个地区包括: 中非(13°E—30°E, 5°S—4°N), Sahel(10°W—20°E, 14°N—20°N), 英国及西欧(10°W—15°E, 51°N—59°N), 美国西南及墨西哥(103°W—91°W, 24°N—34°N), 巴西东北部(60°W—35°W, 2°S—8°S)

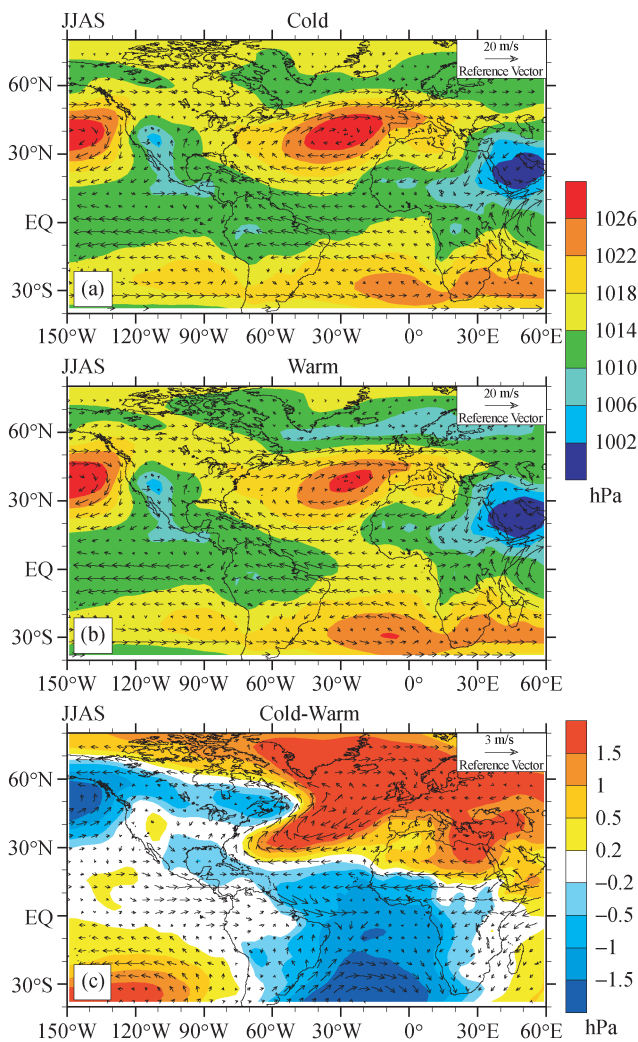


图 3 模拟的 THC 强弱变化所引起的海平面气压和 850 hPa 风场的变化

(a) 弱 THC(冷)阶段的海平面气压和 850 hPa 风场; (b) 强 THC(暖)阶段的海平面气压和 850 hPa 风场; (c) THC 强弱变化所引起的海平面气压和 850 hPa 风场的变化: 弱 THC(冷)—强 THC(暖); 矢量表示 850 hPa 风场, 单位:  $m \cdot s^{-1}$ ; 色标表示海平面气压差, 单位: hPa

### 3 近 100 年 THC 的变化

THC 在大西洋地区表现为 MOC, 而且主要集中在北大西洋地区<sup>[1]</sup>. 对于整个 MOC 来说, 首先是 Gulf Stream(墨西哥湾流)通过佛罗里达海峡向北输送. 一支通过 GIS(格陵兰—冰岛—苏格兰)海脊到达 Nordic Seas(包括挪威海、冰岛海、格陵兰海), 冷却下沉形成流出 GIS 海脊的 NSOW(Nordic

Seas 溢出流); 另一支, 通过副极地环流到达 Labrador Sea(拉布拉多海)并发生深对流, 下沉形成 LSW(拉布拉多深水). NSOW 一半通过丹麦海峡, 另一半通过冰岛—苏格兰海脊, 最后在 Labrador Sea 与 LSW 汇合成 NADW(北大西洋深水)向南回流. Gulf Stream 向北输送的强弱, 从 Nordic Seas 流向北大西洋的 NSOW 的强弱在一定程度上反映了 THC 活动的强弱. 在 WOCE(全球海洋环流实验)和 CLIVR(气候变率和预测)计划支持下, 对这几个关键地区进行了有限和有效的监测. 监测包括: 从 Nordic Seas 流向北大西洋的 NSOW, Labrador Sea, 25°N 大西洋纬向横截面<sup>[37]</sup>. 表 1 是近年通过在几个关键区的观测(表 1 中 1—7)和代用资料(表 1 中 8—10)来研究 THC 的活动变化. 从观测上看(图 4 中 1—7), THC 在 1960 s—1990 s 阶段比较弱, 可惜只有两个观测能延长到 1950 s; 图 4 中 1 和 5 都显示 THC 在 1950 s—1960 s 比较强, 而对于 6 来说, Bogi Hansen<sup>[43]</sup> 研究只是指出 THC 近 50 年来是减弱的, 那么 1950 s—1960 s 应该比后来时间强, 为了方便表述, 就认为从 1950 年来为 THC 弱阶段. 代用资料结果(图 4 中 8—10)与大部分观测所推断的 THC 变化基本一致, 并且代用资料能给出 THC 更长时间的活动序列, 一致显示 THC 在 1920 s—1960 s 活动比较强. 综合观测和代用资料的研究结果, 分别选了 1971—1990 年和 1941—1960 年各 20a 分别代表 THC 活动弱和强阶段.

表 1 近期对北大西洋关键地区观测和利用代用资料来研究 THC 变化的主要结果<sup>a)</sup>

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
观测内容	盐度	洋流	洋流	盐度	盐度	洋流	盐度	海温	海温	海温	降水
文献	[38]	[39]	[40]	[41]	[42]	[43]	[44]	[45, 46]	[15]	[47]	本文

a) 表中 1—7 为对北大西洋关键区的观测, 8—10 为利用代用资料研究结果, 11 为本文研究结果

为了和前文模拟结果相比较, 利用 CRU 观测降水资料分析 THC 的变化对大西洋沿岸降水分布的影响(图 2(b)). 用 1971—1990 年间的平均降水作为弱 THC 阶段的降水分布, 1941—1960 年间平均降水作为强 THC 阶段的降水分布, 用二者差(图 2(b))来研究 THC 变化对降水分布的影响. 图

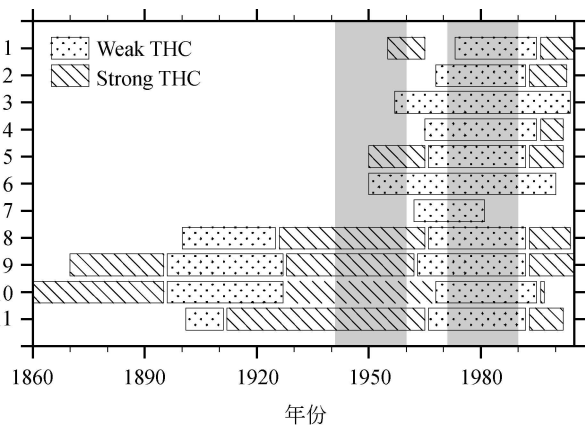


图 4 表 1 中研究 THC 近百年强弱变化情况

图中 1—11 分别对应表 1 中 1—11 序列, 其中 6 Bogi Hansen 只是指出 THC 近 50 年来一直是减弱的, 为了方便, 认为此阶段为弱 THC 阶段, 阴影部分为本文所选代表 THC 弱和强阶段, 各 20 a

2(b) 显示, Sahel、西欧、美国中部、南美东北部降水明显减少; 中非、北美大部、美国西部、美国西南及墨西哥地区、巴西降水明显增加, 而且都通过了 90% 信度检验. 与模拟(图 2(a))相比, 观测所显示由于 THC 强弱变化, 大西洋沿岸降水变化的主要特征与模拟结果基本一致: Sahel、西欧、南美东北部降水减少; 中非、美国西部、美国西南及墨西哥、巴西大部分降水增加. 说明从模式和观测中都显示上述地区的降水对 THC 变化敏感. 通过对比模拟结果和观测选出 5 个降水对 THC 敏感的地区(图 2): Sahel、中非、西欧、美国西南及墨西哥、巴西东北部. 利用这 5 个地区的观测降水资料重建近百年 THC 活动指数 THCI(图 5). 利用 CRU 降水资料, 分别研究冷、暖状态下降水相对于平均气候降水(1901—2002 年降水平均作为平均气候降水)(图略)有很好的对称性, 模式模拟这种降水变化的对称性能力有限, 但对于冷、暖状态(THC 强、弱)变化(即冷—暖下降水分布的变化)模拟较好, 所以本文主要研究由于 THC 强弱变化所造成降水分布的变化.

对 THCI 序列分 3 个阶段进行讨论(图 5). 第一阶段 1901—1911 年: THCI 在这阶段基本处于负位相, THC 在这个阶段活动较弱. 降水曲线中的三条都是负值, 另两条 CAf(中非降水序列乘以 -1)和 A-M(美国西南及墨西哥降水序列乘以 -1)

在 1905 年前后才进入正位相; 第二阶段 1912—1965 年, THCI 和 5 条降水曲线基本都处于正位相; 第三阶段 1966—2002 年, THCI 处于负位相, 在 1970 s 初达到最大负值后回升并接近正常状态, 五条降水曲线也基本处于负位相. 图 4 显示观测和代用资料所反映 THC 强弱变化的主要特征与 THCI 的结果比较一致: 1920 s—1960 s 是 THC 活动强的阶段; 1970 s—1990 s 是 THC 活动比较弱的阶段; 1970 s 初达到最大负值正好与 GSA(大盐度距平事件)<sup>[48]</sup>对应. 这也说明了利用大西洋沿岸降水对 THC 变化的敏感性, 重建反映 THC 活动变化的指数是可行的. 由于观测降水资料有限, 这里只给出 1901—2002 年的 THCI 指数. 同时图 4 也给出了利用 SST 重建的 THC 指数, 显示 THC 在更长时间里的变化: THC 在 1879 s—1890 s 间比较强, 在 1890 s—1920 s 比较弱.

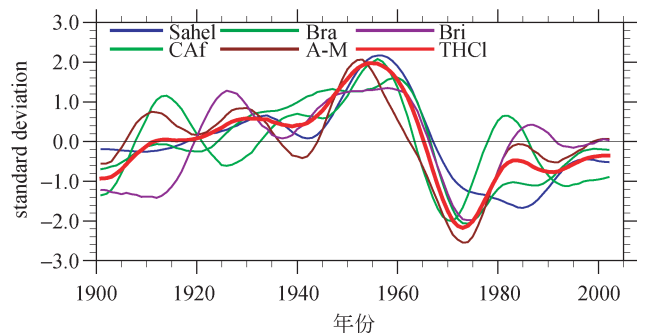


图 5 大西洋沿岸降水对 THC 强弱变化敏感的 5 个地区(图 2)其降水观测序列和用这 5 个序列拟合反映

#### THC 变化的综合指数 THCI

Sahel, CAf, Bra, A-M, Bri 分别代表 Sahel 降水, 中非降水(乘以 -1), 巴西东北部降水(乘以 -1), 美国西南及墨西哥地区降水(乘以 -1), 英国及西欧地区降水序;  $THCI = (Sahel + CAf + Bra + (A-M) + Bri) / 5$ ; 以上所有序列都进行了 31 点滑动滤波和标准化

## 4 总结

THC 活动主要集中在大西洋, 其影响在大西洋地区最为显著. Manabe<sup>[32]</sup>利用淡水强迫 THC, 发现海温变化主要集中在大西洋, 并且以 dipole 模态存在; 以前的研究也显示在代用资料和模式模拟中大西洋海温变化也存在类似的模态, 而且该模态与大西洋地区气候变化紧密联系. 根据 Manabe 研

究结果的海温分布,设计实验驱动大气环流模式,来研究大西洋地区与 THC 变化相关的海温异常对大西洋沿岸气候的影响。研究发现:(1)对于 6—9 月份的降水来说,模式所反映与 THC 变化相关的大西洋沿岸降水变化的主要特征与观测比较一致;(2)对比模拟与观测,选出降水对 THC 强弱变化敏感的 5 个地区,这些地区的观测降水序列所反映 THC 变化的主要特征也比较一致;(3)利用这 5 个地区观测降水序列拟合一个指数,该指数与以前研究重建的指数及观测(图 4)所反映 20 世纪 THC 变化的主要特征也比较一致:1900 s—1920 s THC 弱,1920 s—1960 s THC 强,1970 s—1990 s THC 弱;研究结果说明利用对 THC 变化敏感地区的观测降水资料来研究 THC 长时间里的变化是可行的。本文所重建指数还显示出 THC 在 1990 s 没有进入正位相,而是接近正常状态。由于本文只选取了 5 个降水对 THC 变化敏感的地区,他们的降水同时也受到其他因子,如:印度洋<sup>[24]</sup>、ENSO 和 PDO<sup>[27]</sup>等的影响,实验也只考虑到与 THC 相关的大西洋 SST 变化对周边气候的影响,没有考虑 THC 通过改变其他海域 SST 对气候的影响。因此,利用观测降水资料重建 THC 在过去时间的变化值得进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 Wallace S Broecker. The great ocean conveyor. *Oceanography*, 1991, 4(2): 79—89
- 2 Wunsch C. What is the thermohaline circulation? *Science*, 2002, 298, 1179—1181
- 3 Richard B Alley, Jochem Marotzke, William Nordhaus et al. *Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises*. Washington, DC: National Academy Press 2002, 73—106
- 4 周天军. 大洋温盐环流与气候变率的模拟研究. 北京大学博士学位论文, 北京, 1999
- 5 王绍武, 谢志辉. 千年尺度气候变率的研究. *地学前缘*, 2002, 9: 143—153
- 6 王绍武, 黄建斌. 全新世中期的旱涝变化与中华古文明的进程. *自然科学进展*, 2006, 16(10): 1238—1244
- 7 Wang SW, Zhou TJ, Cai JN, et al. Abrupt climate change around 4 ka BP: Role of the thermohaline circulation as indicated by a GCM experiment. *Advance Atmospheric Science*, 2004, 21(2): 291—295
- 8 Aelly RB, Marotzke J, Nordhaus WD, et al. Abrupt climate change. *Science*, 2005, 299: 2005—2010

- 9 Wallace S Broecker. Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: Will man—made CO<sub>2</sub> upset the current balance? *Science*, 1997, 278: 1582—1588
- 10 Peter Schwartz, Doug Randall. An abrupt climate change scenario and its implications for United States National Security. *The Observer*, 22 Feb. 2004
- 11 Delworth TL, Mann ME. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate Dynamics*, 2000, 16 (9): 661—676
- 12 Richard A Kerr. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, 2000, 28: 1984—1986
- 13 Vellinga M, Wood RA. Decadal variability of North Atlantic deep water transport in the HADCM3 climate model. Abstract volume from the Fourth It Conf Modelling of Global Climate Change and Variability. 1999
- 14 Dong BW, Sutton RT. Mechanism of interdecadal thermohaline circulation variability in a coupled Ocean-Atmosphere GCM. *Journal of Climate*, 2005, 18: 1117—1135
- 15 Knight JR, Allan RJ, Folland CK, et al. A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophysical Research Letter*, 2005, 32: L20708
- 16 Bjerknes J. *Atlantic Air-Sea Interaction*. Advances in Geophysics. New York: Academic Press, 1964, 1—82
- 17 Stocker TF, Mysark LA. Climatic fluctuations on the century time scale: A review of high-resolution proxy data and possible mechanisms. *Journal of Climatic Change*, 1992, 20: 227—250
- 18 Delworth T, Manabe S, Stouffer RJ. Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere model. *Journal of Climate*, 1993, 6(11): 1993—2011
- 19 Delworth T, Manabe S, Stouffer RJ. Multidecadal climate variability in the Greenland Sea and surrounding regions: A coupled model simulation. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24: 257—260
- 20 Timmermann A, Latif M, Voss R, et al. Northern hemisphere interdecadal variability: A coupled air-sea mode. *Journal of Climate*, 1998, 11: 1906—1931
- 21 Folland CK, Palmer TN, Parker DE. Sahel rainfall and worldwide sea temperatures 1901—1985. *Nature*, 1986, 320: 602—607
- 22 Street-Perrott FA, Perrott RA. Abrupt climate fluctuations in the tropics: The influence of Atlantic Ocean circulation. *Nature*, 1990, 343: 607—612
- 23 Hunt BG. Natural climatic variability and Sahelian rainfall trends. *Global and Planetary Change*, 2000, 24: 107—131
- 24 Palmer TN. Influence of the Atlantic, Pacific and Indian Oceans on Sahel rainfall. *Nature*, 1986, 322: 251—253
- 25 Zhang R, Delworth TL. Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes. *Geophysical*

- Research Letters, 2006, 33: L17712
- 26 David B Enfield. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US. *Geophysical Research Letters*, 2001; 2077—2080
- 27 McCabe GJ, Palecki MA, Betancourt JL. Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101: 4136—4141
- 28 Schubert SD, Suarez MJ, Pegion PJ, et al. On the cause of the 1930s Dust Bowl. *Science*, 2004, 303: 1855—1859
- 29 Goldenberg Stanley B, Christopher W Landsea, Alberto MN, et al. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science*, 2001, 293: 474—479
- 30 Appenzeller C, Stocker TF, Schmittner A. Natural climate variability and climate change in the North-Atlantic European region: Change for surprise. *Integrated Assessment*, 2000, 1: 301—306
- 31 Sutton RT, Hodson DL. Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. *Science*, 309: 115—118
- 32 Manabe S, Stouffer RJ. Simulation of abrupt climate change induced by freshwater input to the North Atlantic Ocean. *Nature*, 1995, 378: 165—167
- 33 Kiehl JT, Boville B, Briegleb B et al. Description of the NCAR community climate model (CCM3). NCAR technical note NCAR/ TN -420 + STR, Boulder, Colorado, 1996
- 34 Kiehl JT, Hack JJ, Bonan GB, et al. The national center for atmospheric research community climate model: CCM3. *Journal of Climate*, 1998, 11: 1131—1149
- 35 Rayner NA, Parker DE, Horton EB, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108, doi: 10. 1029/2002 JD002670
- 36 Mitchell T, Jones PD. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 2005, 25: 693—712
- 37 Marsh R, de Cuevas BA, Coward AC, et al. Thermohaline circulation at three key sections in the North Atlantic over 1985—2002. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L10604, doi: 10. 1029/2004GL022281
- 38 Ruth Curry, Cecilie Mauritzen. Dilution of the northern North Atlantic Ocean in recent decades. *Science*, 2005, 308: 1772—1174
- 39 Hátún H, Sandø AB, Drange H, et al. Influence of the Atlantic subpolar gyre on the thermohaline circulation. *Science*, 2005, 309: 1841—1844
- 40 Harry LB, Hannah RL, Stuart AC. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N. *Nature*, 2005, 438: 655—657.
- 41 Peterson, Bruce J McClelland, James Curry, et al. Trajectory shifts in the Arctic and subarctic freshwater cycle. *Science*, 2006, 313: 1061—1066
- 42 Bob Dickson, Igor Yashayaev, Jens Meincke, et al. Rapid freshening of the deep North Atlantic Ocean over the past four decades. *Nature*, 2002, 416: 832—837
- 43 Bogi Hansen, William RT, Svein Østerhus. Decreasing overflow from the Nordic seas into the Atlantic Ocean through the Faroe Bank Channel since 1950. *Nature*, 2001, 411: 927—930
- 44 Brewer PG, Broecker WS, Jenkins WJ, et al. A climatic freshening of the deep Atlantic north of 50° N over the past 20 years. *Science*, 1983, 222: 1237—1239
- 45 Latif M, Coauthors. Reconstructing, monitoring, and predicting decadal-scale changes in the North Atlantic thermohaline circulation with sea surface temperature. *Journal of Climate*, 2004, 17: 1605—1614
- 46 Latif M, Böning C, Willebrand J, et al. Is the thermohaline circulation changing? *Journal of Climate*, 2006, 19: 4631—4637
- 47 Gray WM. Hypothesis on the cause of global multi-decadal climate change. *Proceedings of the Twenty-Second Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop*, 1997, 112—115
- 48 Dickson RR, Meincke J, Malmberg SA, et al. The great salinity anomaly in the northern North Atlantic 1968—1982. *Progress in Oceanography*, 1988, 20: 103—151