

大洋温盐环流与气候变率的关系

周天军^① 张学洪^① 王绍武^②

(^①中国科学院大气物理研究所 LASG 国家重点实验室, 北京 100029; ^②北京大学地球物理系, 北京 100871.

Email: zhou@lasg8.iap.ac.cn)

摘要 利用中国科学院大气物理研究所 (IAP) 大气科学与地球流体力学国家重点实验室 (LASG) 的海气陆耦合气候系统模式 (GOALS), 讨论了在当今气候态下, 大西洋温盐环流的变率特征及其与气候变率之间的联系, 发现温盐环流强度的变化与北大西洋涛动 (NAO) 成显著的负相关. 在此基础上, 根据器测资料揭示的 20 世纪 NAO 和表层海温的实际变化特点, 对温盐环流变率进行了评估, 指出 1867 年以来大西洋温盐环流活动大致经历了强、弱、强、弱 4 个阶段, 转折点分别在 1904 年、1934 年和 1972 年前后.

关键词 温盐环流 北大西洋涛动 气候变率

地球气候系统是由大气、海洋、岩石圈、冰雪圈和生物圈组成的复杂系统, 热带的加热作用和极地的冷却作用, 是驱动和控制该系统的环流形势的主要因子. 在维持地球气候系统的能量平衡方面, 经向环流发挥着极为重要的作用; 在大气中, 它表现为著名的 Hadley 环流、Ferrel 环流和极地环流; 在海洋中, 它表现为温盐环流.

相对于大气 Hadley 环流等, 大洋温盐环流是一个新概念. 位于表层风生流之下的深层洋流, 是受重力作用下高纬稠密水团的下沉和低纬较轻水团的上升驱动的, 其水输送量约占全球大洋的 90%; 因为海水的密度主要由温度和盐度决定, 所以这种由密度梯度驱动的深层洋流, 被称为“温盐环流”. 当代大洋温盐环流以大西洋输送带环流为特征. 在北大西洋副极地海域, 冬季强烈的辐射冷却, 导致海冰形成并扩展. 冷却作用和海水结冰时盐析作用的共同影响, 使表层海水密度骤增, 海洋层结出现不稳定, 对流发生, 冷而咸的水团下沉, 位能转换成动能, 在一定深度上, 向着赤道方向流去, 期间低纬加热作用令海水密度减小而逐渐上翻; 随后, 在相对较浅的深度上, 从低纬流回高纬, 从而构成闭合环流^[1,2].

温盐环流在自低纬向高纬的极向热输送中发挥着重要作用. 温盐环流的稳定性、变率以及与之相联系的极向热输送, 将对局地 and 全球气候产生明显影响. 因此, 当前全球气候研究领域最为重要的两个国际计划——PAGES(过去全球变化研究)^[3]和 CLIVAR(气候变率与可预报性研究)^[4], 都强调要开展大洋温盐环流研究. 有关温盐环流与气候变率问题的研究, 是 90 年代以来在气候变化研究领域的一个重要的新进展.

海洋观测资料的极度匮乏, 使得数值模拟成为一种主要的研究手段. 我们^[5,1]曾对国际上有关温盐环流的研究进行了系统性总结, 指出此前该领域的大量工作多集中在利用 OGCM 研究海洋的内部变率, 未能与众所关心的当今气候问题联系起来. 因此, 以揭示与温盐环流有关的现代气候变率为目标, 本文利用 IAP/LASG 海气陆耦合模式 GOALS, 通过数值模拟手段, 探讨了在当今气候态下, 大洋温盐环流的变率特征及其与气候变率的关系; 在此基础上, 根据器测资料, 对 20 世纪温盐环流活动进行了评估.

1) 周天军. 大洋温盐环流与气候变率的模拟研究. 北京大学博士研究生学位论文, 1999

1 海气陆耦合气候系统模式(GOALS)简介

GOALS 的大气部分是一个在引进基础上改进的谱模式, 水平方向为菱形十五波截断, 其水平分辨率约相当于 7.5° (经度) $\times 4.5^\circ$ (纬度); 在垂直方向采用 s 坐标, 分为不等间距的 9 层, 有 3 层位于行星边界层. 为减小截断误差, 模式引入了一个全球平均气温和重力位势高度的标准层结扣除. 辐射加热采用关于整个长波和短波近红外波段气体吸收透过率函数的拟合方案(K -分布)^[6]. 模式中的云是由模式变量诊断得到的^[7]. GOALS 在大气模式耦合了一个比较先进的陆面过程模式, 它包括 1 个植被层和 3 个土壤层, 考虑了 11 种类型的植被^[8].

GOALS 的海洋部分为一原始方程格点模式^[9], 在垂直方向使用 h 坐标, 分为不等距的 20 层, 有 9 层落在温跃层内, 最大深度是 5 500 m. 模式在水平方向使用经纬网格, 分辨率是 5° (经度) $\times 4^\circ$ (纬度), 模式变量分布在 B 网格系统上. 模式的海陆分布和海底地形近于真实, 由于在球坐标中无法定义极点的速度, 北极点被当作孤岛处理. 海洋模式耦合了一个热力学海冰模式来预报两极附近的海冰分布和厚度^[10].

海洋与大气模式的耦合采用的是“修正的月通量距平耦合方案”^[11]. 海洋和大气通过其界面交换动量和热量. 模式采用 Newton 张弛形式的恢复性条件, 把海表盐度向观测值恢复. GOALS 完成了 200 a 的耦合积分, 分析表明, 模式成功地控制了海表气候漂移, 能够较为真实地再现当今大气和海洋气候^[12]. 模式逐年输出的年平均结果是本文分析工作的基础.

2 温盐环流的变率特征

人们一般利用经向流函数来反映大洋环流的总的经向输送特征. GOALS 模拟的 200 a 平均大西洋经向流函数如图 1 所示. 其中, 正值表示逆时针方向流动, 负值表示顺时针方向流动. 可见模式对北大西洋深层水(NADW)和南极底层水(AABW)的模拟是成功的, 北大西洋深层水的跨赤道输送极为明显, 其南向溢流可以达到 30° S.

为反映大西洋温盐环流的强度变化, 将年平均温盐环流强度指数(THC)定义为图 1 中其流函数在 60° N 附近下沉支的最大值. 由此得

到的温盐环流强度序列如图 2(a)所示. 在整个 200 a 时间段内, 围绕着约 $11.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 的年平均值, 大西洋温盐环流始终存在着明显的年际振荡, 其高、低峰值在 $10.5 \times 10^6 \sim 12.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间, 振荡幅度达 $2.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右. 叠加在年际变率之上, 还有明显的年代际振荡. 图 2(b)显示 THC 序列的谱分布特征, 其主导性周期为 24 a 左右.

为反映与温盐环流活动相联系的模式表层海温(SST)的变化特征, 将 THC 序列与每一个格点上年均 SST 的时间序列求相关, 结果如图 3(a)所示. 可见 THC 与 SST 的相关分布型呈东西反对称的双核结构. 纽芬兰东南向大洋, SST 变化与温盐环流成负相关, 温盐环流强, SST 冷, 在北大西洋其他海域, SST 变化与温盐环流成正相关, 温盐环流强, SST 暖, 暖中心靠近大

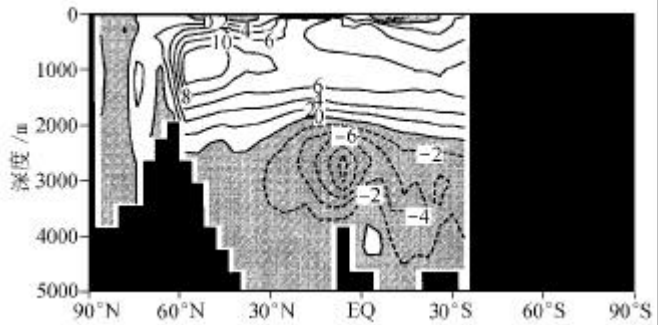


图 1 GOALS 模拟的 200 a 平均的大西洋经向流函数
单位为 $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$

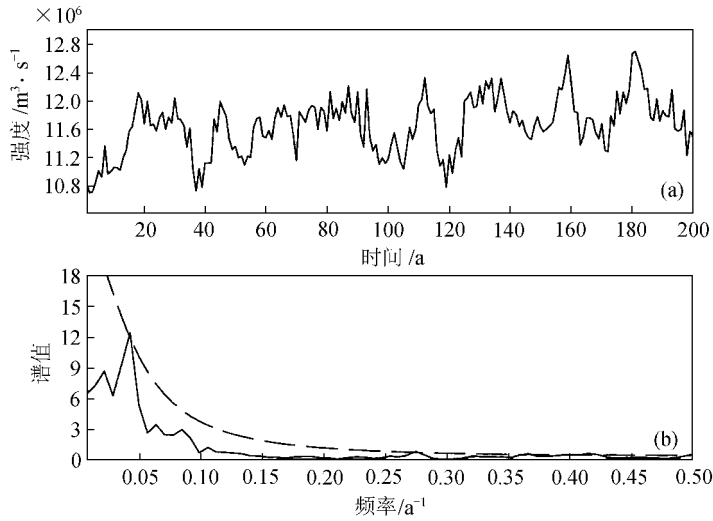


图 2 GOALS 模拟的大西洋温盐环流强度指数序列(a)及其谱分布(b)
(b)中的点线表示 95% 的信度检验

洋东部。

为直观反映伴随着温盐环流的年代际振荡, 模式北大西洋 SST 所发生的变化, 根据图 2(a), 选取 THC 指数较高的两个 10 年(第 128 ~ 137, 176 ~ 185 模式年), 取其平均值, 代表年代际高 THC 指数状态; 选取 THC 指数较低的两个 10 年(第 33 ~ 42, 97 ~ 106 模式年), 取其平均值, 代表年代际低 THC 指数状态. 高、低指数下相应物理量的差, 反映的就是年代际强、弱温盐环流状态下, 模式海表特征的变化情况. 结果如图 3(b)所示, 阴影区表示通过了 95% 信度的 t 检验. 可见, SST 异常的分布型, 与图 3(a)中的相关型非常一致. 温盐环流强, 纽芬兰岛东南海域为负距平, 中心值 -0.6°C ; 北大西洋其他海域为正距平, 中心靠近大洋东部, 中心值 0.4°C . 对北大西洋区域年均 SST 的距平作 EOF 分解, 发现图 3 所示结构是该海域 SST 的一个主要变率型, 它解释了总方差的 12.6%(图略).

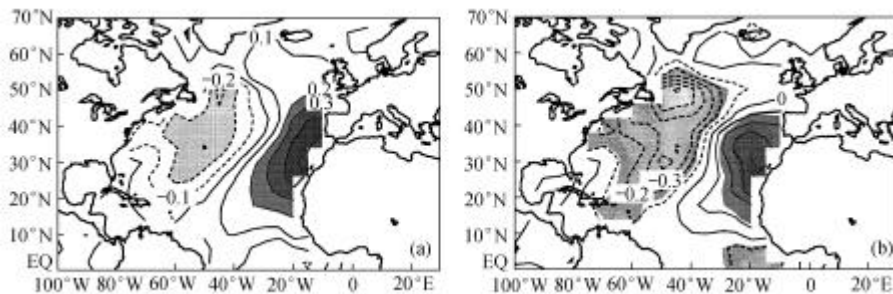


图 3 THC 序列与模式年平均 SST 的相关系数(a)及年代际强、弱温盐环流状态下模式 SST 的差值场(b)
(b) 单位为 $^{\circ}\text{C}$

3 温盐环流与区域气候变率

为揭示模式中温盐环流与区域气候之间的联系, 将 THC 序列与全球年平均模式海平面气压

逐点求相关, 结果如图 4(a)所示, 只有北大西洋地区的相关系数超过 95%的信度检验, 表现出一种类似负 NAO 的分布型, 预示着 THC 与 NAO 指数成负相关. 将 THC 指数序列直接与 NAO 指数序列求相关, 得到的相关系数为-0.26, 达到 95%信度要求, 表明 THC 与 NAO 之间确实存在着显著的负相关关系.

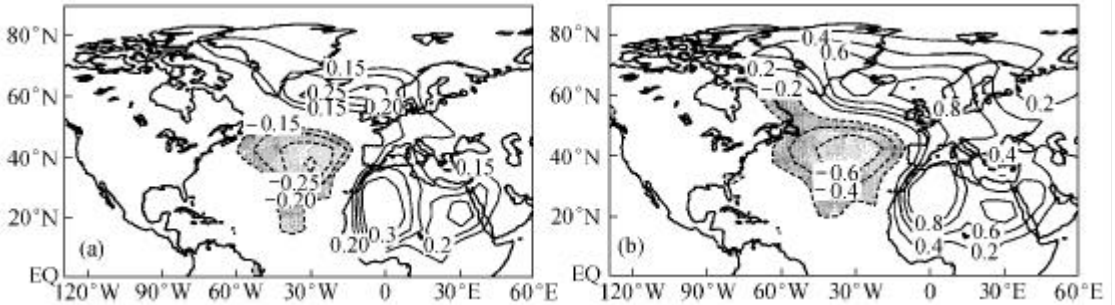


图 4 模式中 THC 与年海平面气压的相关系数(a)及强、弱温盐环流状态下海平面气压的差值场(b)
(b) 单位为 hPa

将 THC 序列标准化, 正、负以一个标准偏差为界, 高于一个标准差的所有年份的平均代表高指数年, 低于一个负标准差的所有年份的平均代表低指数年, 高、低 THC 指数年海平面气压的差值场如图 4(b)所示, 同样呈现出一种负 NAO 型.

4 20 世纪温盐环流变率试评估

海洋观测资料的匮乏, 使得我们无法直接给出实际的大西洋温盐环流的指数序列. 下面利用相对丰富的海平面气压和 SST 观测资料, 来评估 20 世纪温盐环流的变化. IPCC95 报告基于实际观测资料, 给出了 1867~1995 年的北大西洋涛动指数^[13]. 按照该指数序列, 1867 年以来 NAO 活动大致经历了弱、强、弱、强 4 个阶段, 转折点分别在 1904, 1934 和 1972 年左右. 根据 GOALS 揭示的 THC 与 NAO 活动成负相关这一规律, 20 世纪温盐环流变率大致是: 1904 年前后由强转弱, 1934 年前后由弱转强, 1972 年前后又由强转弱. 自 1995 年开始, NAO 呈减弱趋势, 预示着 THC 活动进入一个新的增强期.

与温盐环流增强相对应, 纽芬兰东南海域变冷, 北大西洋其他地区则变暖. Enfield 等人在副极地北大西洋选取了一块区域(45~65° N, 20~60° W), 对观测的 SST 求区域平均, 得到自 1858 年以来其距平变化的长期序列, 结果如图 5 所示^[14].

从大的趋势来看, 自 1860 年以来, 副极地北大西洋先后经历了暖、冷、暖、冷 4 个阶段, 转折点分别在 1904, 1930 和 1972 年前后, 而自 1995 年起又开始变暖. 其相关分析表明, 伴随着副

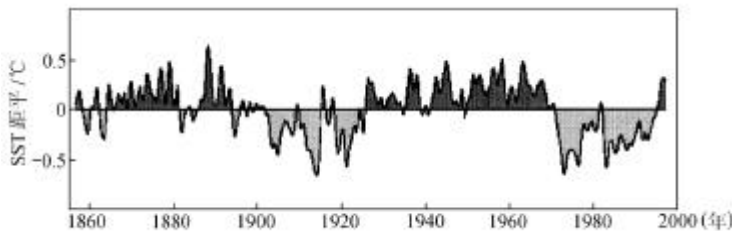


图 5 观测的副极地北大西洋区域(45~65° N, 20~60° W)的平均 SST 距平序列^[14]

极地海域的变暖, 纽芬兰东南大洋的确变冷(图略)^[14]. 该特点与 GOALS 的模拟结果基本一致. 因此, 根据 SST 的实际变化特点, 大西洋温盐环流在 1904 年前后由强转弱, 1930 年前后由弱转强, 1972 年前后又由强转弱, 该趋势与基于 NAO 活动的评估结果大致相同.

致谢 本工作为国家“九五”重中之重项目(批准号: 96-908-02-01), 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49635190)和优秀国家重点实验室研究项目(批准号: 49823002).

参 考 文 献

- 1 Broecker W S. The great ocean conveyor. *Oceanography*, 1991, 4: 79 ~ 89
- 2 Schmitz Jr W J. On the interbasin-scale thermohaline circulation. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33: 151 ~ 173
- 3 Duplessy J C, Overpeck J. The PAGES/CLIVAR intersection-providing the paleoclimatic perspective needed to understand climate variability and predictability. Report of a Joint IGBP/WCRP Workshop, Venice, Italy, 1994
- 4 CLIVAR Initial Implementation Plan (WCRP, 103). Hamburg: International CLIVAR Project Office, 1998. 213 ~ 229
- 5 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
- 6 吴国雄, 张学洪, 刘 辉, 等. LASG 全球海洋-大气-陆面系统模式(GOALS/LASG)及其模拟研究. *应用气象学报*, 1997, 8(增刊): 15 ~ 28
- 7 Liu H, Zhang X H, Wu G X. Cloud feedback on variability of SST of western equatorial Pacific in GOALS/LASG model. *Adv Atmos Sci*, 1998, 15: 410 ~ 423
- 8 Xue Y K, Sellers P J, Klinger J L, et al. A simplified biosphere model for global climate studies. *J Climate*, 1991, 4: 345 ~ 364
- 9 Zhang X H, Chen K M, Jin X Z, et al, Simulation of the thermohaline circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model. *Theoretical and Applied Climatology*, 1996, 55: 65 ~ 87
- 10 Parkinson C L, Washington W M. A large-scale numerical model of sea ice. *J Geop Res*, 1979, 84: 311 ~ 337
- 11 俞永强, 张学洪. 一个修正的海气耦合方案. *科学通报*, 1998, 43: 866 ~ 870
- 12 张学洪, 俞永强, 刘 辉. 冬季北太平洋海表热通量异常和海气相互作用. *大气科学*, 1998, 22: 512 ~ 521
- 13 Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, et al. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 1996. 166
- 14 Gray W M. The Atlantic Ocean thermohaline circulation as a driver for multi-decadal variations in El niño intensity and frequency. In: *Proceedings of the Twenty-third Annual Climate Diagnostic and Prediction Workshop*. Florida: American Meteorology Society, 1998. 54 ~ 57

(1999-06-24 收稿, 1999-12-09 收修改稿)