

李双林,王彦明,郜永祺.北大西洋年代际振荡(AMO)气候影响的研究评述[J].大气科学学报,2009,32(3):458-465.

## 北大西洋年代际振荡(AMO)气候影响的研究评述

李双林<sup>1</sup>,王彦明<sup>1,2</sup>,郜永祺<sup>1</sup>

(1.中国科学院大气物理研究所 竺可桢—南森国际研究中心,北京 100029;

2.中国海洋大学海洋环境学院,山东 青岛 266003)

**摘要:**北大西洋年代际振荡(the Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)是发生在北大西洋区域空间上具有海盆尺度、时间上具有数十年尺度的海表温度(sea surface temperature, SST)准周期性暖冷异常变化。它具有 65~80 a 周期,振幅为 0.4 。AMO 的形成与热盐环流的准周期性振荡有关,它是气候系统的一种自然变率。诸多研究表明,AMO 在北大西洋局地气候及全球其他区域气候演变中发挥了重要影响。欧亚大陆的表面气温,美国大陆、巴西东北部、西非以及南亚的降水,北大西洋飓风等都与之密切相关。AMO 对东亚季风气候的年代际变化有显著的调制作用,暖位相 AMO 增强东亚夏季风,减弱冬季风,冷位相则相反。本文总结了这方面的研究进展,讨论了 AMO 对未来气候预测的意义,认为最近 20 多年来我国冬季的显著增暖与 AMO 处于暖位相有关,是人类温室气体强迫与暖位相 AMO(自然因子)两种增暖影响相叠加的结果。随着 AMO 逐渐转入冷位相,我国冬季变暖趋势将放慢,并有望于 21 世纪 20 年代中期逆转。

**关键词:**北大西洋年代际振荡(AMO);海面温度;东亚季风;气候变化

**中图分类号:** P461.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2009)03-0458-08

## A Review of the Researches on the Atlantic Multidecadal Oscillation(AMO) and Its Climate Influence

LI Shuang-lin<sup>1</sup>, WANG Yan-ming<sup>1,2</sup>, GAO Yong-qi<sup>1</sup>

(1. Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Abstract:** The Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), which is the fluctuation pattern of North Atlantic sea surface temperature (SST), varies over basin spatial scale and multidecadal temporal scale. It has a period of 65—80 years and an amplitude of 0.4 . The AMO is found arisen from internal variability of climate system, particularly linked to quasi-periodic fluctuation of the Thermohaline Circulation (THC). Previous studies have revealed that the AMO has significant influences on the global and regional climate of the twentieth century including surface temperature in Eurasia, precipitation in North America, Northeast Brazil, African Sahel and India, as well as hurricanes in Atlantic. Furthermore, the AMO acts as a pacemaker of multidecadal climate variations of the East Asia. The warm-phase AMO intensifies the East Asian summer monsoon but weakens the winter monsoon, and vice versa. This article summarizes the progress of this aspect and discusses the AMO's implications for the climate projection in the future decades. It is argued that significant winter warming in China in the recent two decades has been arisen from both the anthropogenic forcing of greenhouse gas and the natural forcing dominated by the AMO. Along with the AMO entering a cold phase, the winter warming in China is projected to slow down, or even reverse by the middle term of 2020s.

收稿日期: 2009-01-10; 改回日期: 2009-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90711004); 中国科学院“百人计划”项目(8-059405); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-BR-14)

作者简介: 李双林(1966—),男,湖北孝感人,博士,研究员,博士生导师,研究方向为热带外大气环流异常、海气相互作用及对对流层影响平流层动力过程, shuanglin.li@mail.iap.ac.cn

**Key words:** Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO); sea surface temperature (SST); East Asian monsoon; climate change

## 0 引言

海水在空间上存在着温度和盐度的差异,因密度分布不同导致深层海水的缓慢运动称之为热盐环流(the Thermohaline Circulation, THC)。热盐环流的重要性在于,它与大气中著名的 Hadley 环流、Ferrel 环流和极地环流等一起,构成了维持全球气候系统能量平衡至关重要的经向环流体系。

在整个能量传输系统中,大西洋是最重要的低纬度向高纬度的热输送区域。据估算,在 24°N 处,大西洋的热输送为 1 PW (1 PW =  $10^{15}$  W)<sup>[1-2]</sup>,占该纬度上所有大洋的经向热输送总量(2.0 PW)的一半。热量的输送主要是来自北大西洋暖流在向北输送过程中冷却释放热量。北大西洋暖流,墨西哥湾流的北支,属于暖水系环流,在北移过程中为欧洲及其以北地区带来温暖湿润气候,有研究认为是受热盐环流推动产生<sup>[3-5]</sup>。随着全球气候变暖,热盐环流可能减弱<sup>[6]</sup>,将导致北大西洋暖流的减弱,引起气候的巨大变化<sup>[7-8]</sup>。

全球气候系统变暖是毋庸置疑的。IPCC 第四次评估报告<sup>[9]</sup>指出,最近 50 a (1956—2005 年)全球地表温度的增暖趋势为每十年 0.13 °C,且北极地区温度升高的速率几乎是全球平均速率的两倍;积雪和海冰面积也相应减少,1978 年以来的卫星观测资料显示北极年平均海冰面积以每十年 2.7% 的速率退缩;同时,海平面的上升与全球变暖也是一致的,自 1961 年以来,全球平均海平面上升的平均速率为每年 1.8 mm,而从 1993 年以来平均速率高达每年 3.1 mm。全球变暖已经引起了全世界的关注,但温室效应排放等人类强迫与气候系统自然振荡各自起到了多大作用还是一个争论较多的问题。

全球增暖引发热盐环流减弱和气候剧烈变化。它是从两方面来影响的,一方面是增温,海温升高将导致热膨胀,使得海平面升高,另一方面是高纬度表层海水淡化,冰川、冰帽以及极地冰盖的加速融化会引起海水总质量增加,盐度降低。这两方面都使得高纬度表层海水密度降低,阻碍深层冷水团的合成,高低纬密度差异的减弱,最终导致热盐环流的减弱。

热盐环流减弱,会造成极地热输送的减弱,从而降低北大西洋的表面温度,最终影响北美以及欧洲西北部的气候。IPCC 第三次评估报告<sup>[10]</sup>特别就这

个问题作了深入讨论,通过多个海气耦合模式结果发现,热盐环流虽然是在减弱,但是欧洲的气候还是处于增暖状态,这可能与人类温室气体引起的增暖大于热盐环流减弱造成的降温有关。但是从 THC 的周期来看,它对气候的影响将是长期的、巨大的,全球变暖背景下 THC 的减弱直至关闭,尽管被认为是“低可能性”、“高影响力”的事件,但依然引起了全世界的关注。北大西洋区域作为热盐环流的关键区域,其气候的异常变化更是受到了关注,体现北大西洋海温年代际变率的北大西洋年代际振荡(AMO)被认为是受 THC 的驱动产生,是一种气候系统的内部自然变化,其对气候的影响自然成为研究热点。

## 1 AMO 及指数

很多研究都发现北大西洋海盆尺度海温具有显著的多十年尺度,存在暖冷位相交替出现的变化<sup>[11-19]</sup>。Bjerknes<sup>[11]</sup>最早就北大西洋海温异常和海平面气压(sea level pressure, SLP)异常分析发现,在 1920—1960 年期间,北大西洋 30°~50°N 区域海温有逐渐增暖的趋势,同时 SLP 场与海温异常一致,在 50°N 附近出现负异常,冰岛低压增强,在 30°N 附近出现正异常,亚速尔高压增强。之后,Folland 等<sup>[12]</sup>发现,1960—1980 年北大西洋海温逐渐进入变冷的阶段;1990 年至今,北大西洋海温又进入暖期<sup>[4,16-18]</sup>。Kerr<sup>[19]</sup>在 2000 年正式定义这种海温的年代际变化为“北大西洋年代际振荡(AMO)”。它是发生在北大西洋区域具有海盆尺度的、多十年变率的 SST 异常变化,是一种自然变率,具有 65~80 a 的周期,振幅为 0.4 °C。

更好地研究 AMO 的年代际变率离不开 AMO 指数的时间序列。参考 Enfield 等<sup>[18]</sup>的工作,Wang 等<sup>[20]</sup>定义 AMO 指数为区域(75°~7.5°W, 0°~60°N)的海表温度异常的年平均。在计算过程中,去掉了海温异常的线性趋势,目的是去掉全球增暖的影响,且作了九点滑动平均。图 1a 是 1856—2007 年 AMO 指数的时间序列。由图 1a 可以很清晰地看到,19 世纪末至 20 世纪 20 年代中期、20 世纪 50 年代末至 80 年代为 AMO 的两个冷(负)位相期;而 20 世纪 30 年代至 50 年代中期、90 年代早期至今为 AMO 的两个暖(正)位相期。同时,计算

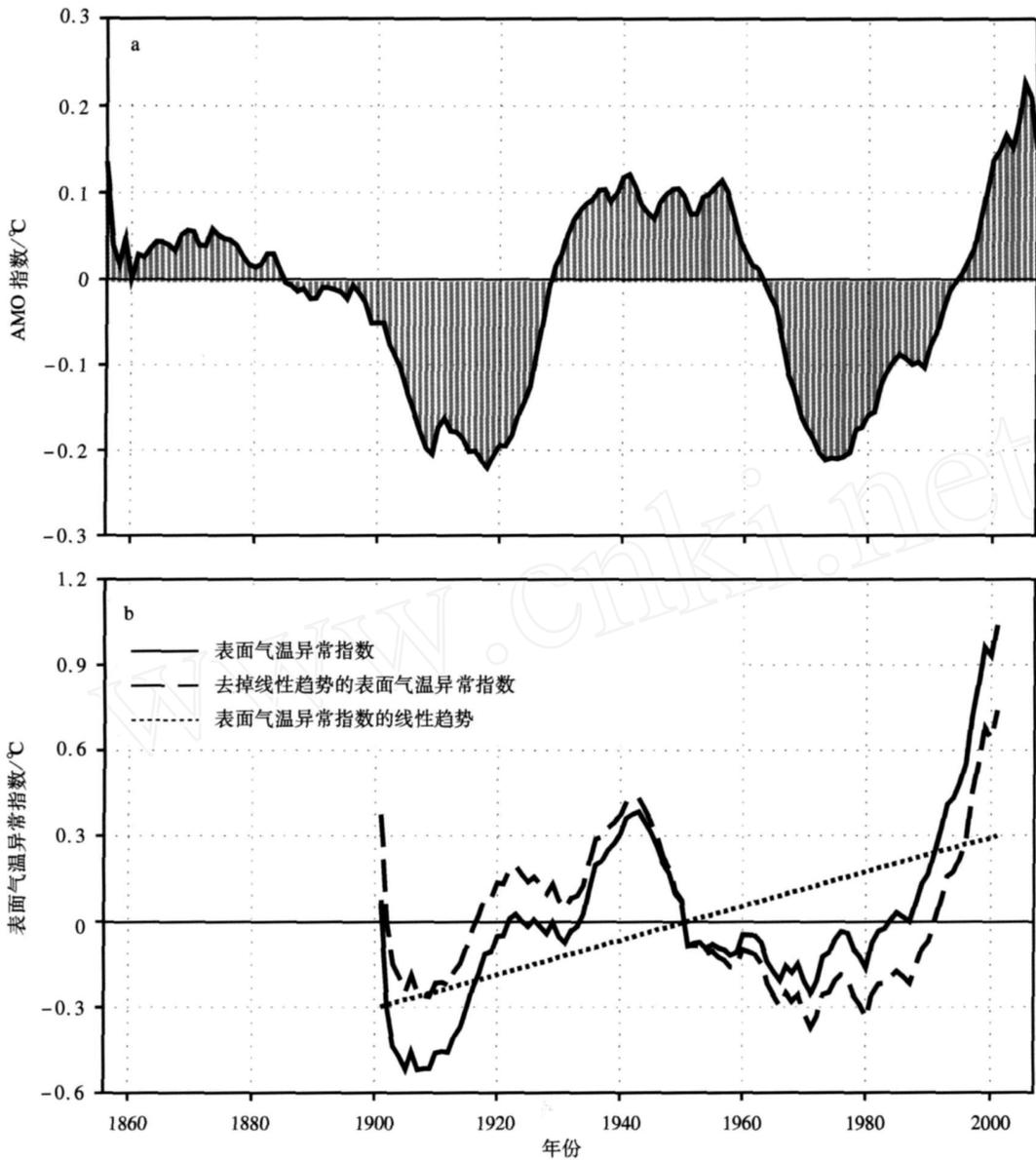


图 1 AMO 指数 (a; 单位: ) 与东亚表面气温异常指数 (b; 实线: 东亚表面气温异常指数, 取  $90^{\circ}\text{E} \sim 125^{\circ}\text{E}$ ,  $22.5^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$  区域平均; 点线: 温度异常的线性趋势; 虚线: 去掉线性趋势后的温度异常; 单位: ) 的演变

Fig 1 Temporal evolutions of (a) the AMO Index ( ) and (b) East Asia surface temperature anomaly index ( ; solid line: surface temperature anomaly calculated by averaging over  $22.5^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $90^{\circ}\text{E} \sim 125^{\circ}\text{E}$  region; dashed line: the linear trend of surface temperature anomaly; broken line: detrended surface temperature anomaly)

了各个季节的 AMO 指数, 发现跟年平均指数的基本趋势是一致的, 说明 AMO 没有明显的季节变化。

## 2 AMO 的气候影响

### 2.1 对亚洲气候的影响

对于东亚地区, 已有研究发现 AMO 有利于东亚气候的增暖, 并在一定程度上增强了东亚夏季风, 减弱了东亚冬季风。Li 等<sup>[21]</sup>通过观测分析和多个大气环流模式模拟发现, AMO 的暖 (正) 位相, 对应

着中国大部分地区的暖冬<sup>[22]</sup>, 华南沿海地区少雨且北部多雨。Wang 等<sup>[20]</sup>拓展了 Li 等<sup>[21]</sup>的工作, 研究了 AMO 在不同季节的影响, 通过观测分析和多模式模拟研究发现, AMO 的暖 (正) 位相不仅对应着中国大部分地区的暖冬, 而且在各个季节都会使得东亚地区增暖 (图 2、图 3)。利用 SVD 方法也发现, 大西洋海表温度与我国河套以南及长江中游地区冬季气温有显著正相关<sup>[23]</sup>, 也与我国长江流域的降水以及东亚夏季风存在显著相关<sup>[24]</sup>。Lu

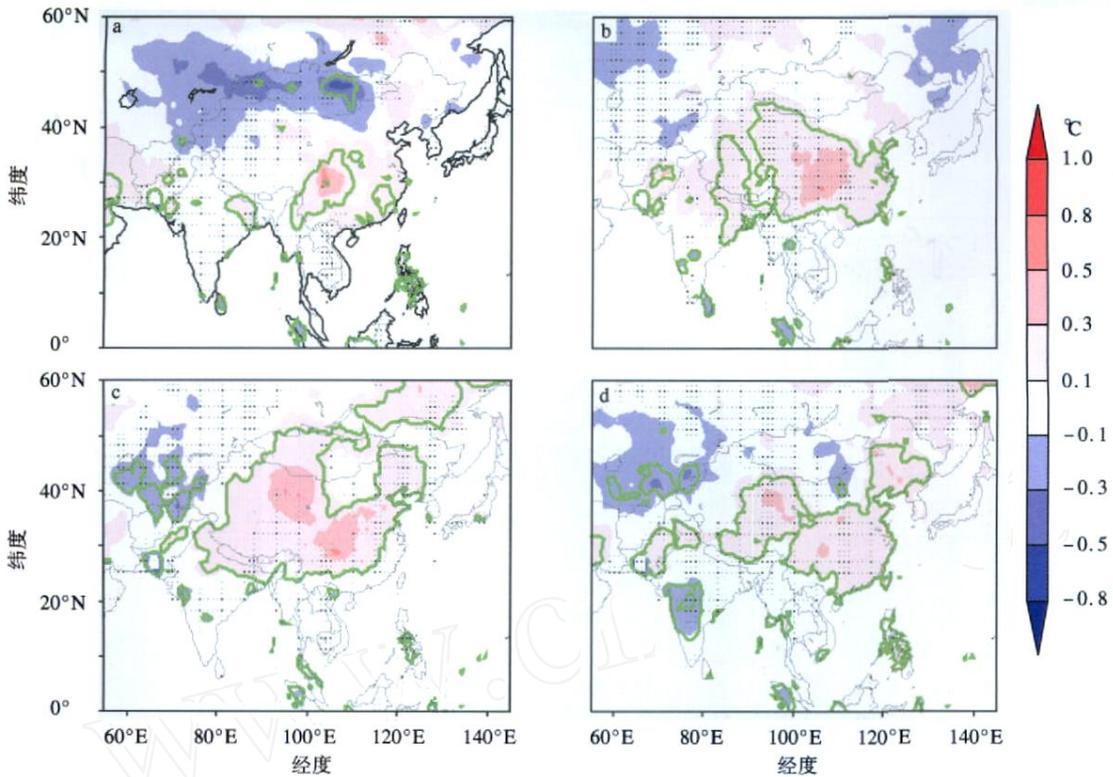


图 2 冬 (a)、春 (b)、夏 (c)、秋季 (d) 表面气温与 AMO 指数的回归分布 (引自文献 [20]); 绿色等值线表示通过 0.05 显著性水平检验; 打点区域表示利用一阶自回归 (AR-1) 模型通过不确定性估计; 单位: ( )

Fig 2 Regression patterns of detrended surface temperature onto the AMO Index in (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, and (d) SON (from reference [20]); the green contours indicate significant at 95% level by a local Student's *t* test; the areas marked by black dots indicate passing uncertainty estimate based on the first-order autoregression error model (AR-1); units: ( )

等<sup>[25]</sup>的工作发现,AMO的暖(正)位相导致更强的东亚夏季风,这点与年际尺度上北大西洋 SST 的影响有相似之处,入梅早的年份,北大西洋海温较常年偏暖;入梅晚的年份,前期冬春北大西洋海温较常年偏冷<sup>[26]</sup>。关于 AMO 影响东亚气候的机制还不明确,需要进一步的研究,目前有两种观点:一是 AMO 引起西太平洋的海气反馈作用<sup>[25]</sup>,二是 AMO 通过影响大气环流引起欧亚对流层气温变化<sup>[21]</sup>。Wang 等<sup>[20]</sup>的工作支持后一种机制,即 AMO 通过加热欧亚对流层中高层,加强了海陆之间的热力差异,最终影响季风。

南亚地区,当前研究发现 AMO 的暖(正)位相对应着印度夏季更多的降水<sup>[20,25,27-31]</sup>,这种关系自 19 世纪 70 年代以来尤为显著。然而 AMO 影响南亚气候的机制存在很多不同的观点:Zhang 等<sup>[27]</sup>认为 AMO 的暖(正)位相会引发赤道辐合带(IICZ)的北移,撒赫尔和印度上空的异常西南风,又会增加其夏季降水;GoSwami 等<sup>[28]</sup>认为暖(正)位相的 AMO 使得在欧亚产生一个类似夏季 NAO 型的南北

偶极子型异常大气环流,使得欧亚对流层变暖,加强了南亚次大陆和印度洋的热量差异,最终导致更强的夏季风。Lu 等<sup>[25]</sup>的模式结果部分支持 GoSwami 等<sup>[28]</sup>的观点;Feng 等<sup>[29]</sup>认为暖(正)位相 AMO 加热了青藏高原,加强了青藏高原和热带印度洋低中纬的对流层的热力温度梯度,因此增强了印度夏季风;Lu 等<sup>[25]</sup>和 Li 等<sup>[30]</sup>分别通过海气耦合模式和大气环流模式进行集合试验发现,AMO 确实引起更多的印度夏季降水,但没有 NAO 型的大气环流响应,这一结果与 Feng 等<sup>[29]</sup>是一致的。Li 等<sup>[30]</sup>进一步研究认为,AMO 影响增强南亚夏季风主要是通过其热带外部分,而且是通过两种途径:一是增强季风低压,二是在中高纬度地区引起波列状响应,使得印度地区上升运动被动增强,从而加强了印度地区的对流层温度梯度,加大了热力差异,加强了西南季风。

图 2 是依文献 [20] 复制的,它给出了 1901—2001 年 4 个季节的 AMO 指数与亚洲季风区表面温度的回归分布。由图 2 可以看到,AMO 的暖(正)位

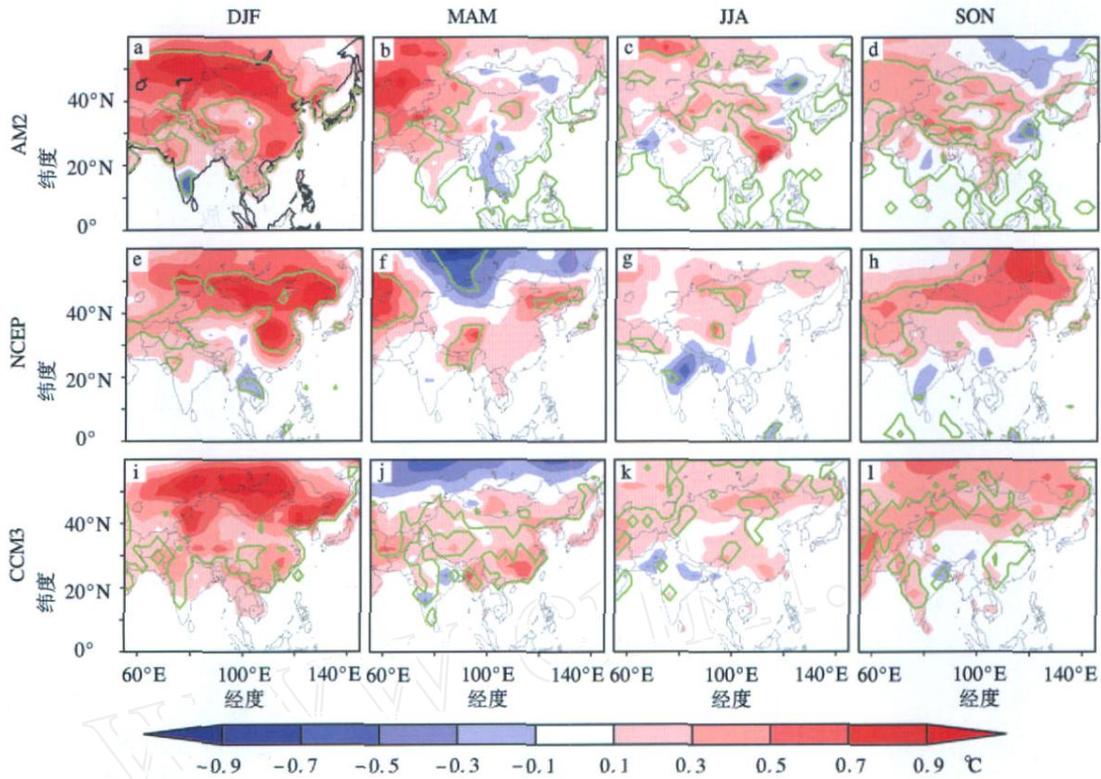


图 3 模式试验得到的表面气温对 AMO 暖位相期间北大西洋 SSTA 的响应 (引自文献 [20]; 由左至右分别对应冬、春、夏、秋季; 由上到下分别是 3 个模式 AM2、NCEP AGCM、NCAR CCM3 的结果; 绿色实线包围区域表示通过 0.05 显著性水平检验; 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig 3 Response of simulated surface temperature on SSTA of North Atlantic during the warm phase of AMO (from reference [20]; the panels from left to right correspond to DJF, MAM, JJA and SON, and those from upper to lower stand for the AM2, the NCEP AGCM, and the NCAR CCM3, respectively; the green contours indicate significant at 95% level; units:  $^{\circ}\text{C}$ )

相会使得东亚大部分地区变暖, 并且这一关系不仅冬季存在, 而且一年四季都存在; 夏秋季南亚中部地区出现降温, 冬、春季南亚北部增暖。这些现象得到了大气环流模式的验证。图 3 是依文献 [20] 复制的, 显示了 3 个大气环流模式模拟的亚洲季风区表面温度对 AMO 暖位相期间大西洋海温异常 (SSTA) 的响应。这里, SSTA 是 AMO 暖位相与冷位相的海温异常的差值, 代表着加倍增强了的 AMO 暖位相的情况。可以看到, 3 个模式的结果基本是一致的, AMO 的暖 (正) 位相都对应了欧亚大陆大部分地区的增暖, 同时在 NCEP 模式结果中发现南亚地区夏秋季中部地区变冷。对比图 2 和图 3, 模式结果和观测分析存在很大相似性, 东亚地区尤其是我国在四季均出现增暖现象。对比观测, NCEP 模式也模拟出南亚夏秋季的北暖南冷型分布。

## 2.2 对于其他地区气候的影响

均处于中纬度地区的北美和北欧拥有对 AMO 相似的响应<sup>[15, 16-18]</sup>。AMO 对于北美气候的影响可以

从降水和河流流量的改变上看到。最显著变化出现在夏季, AMO 的暖 (正) 位相, 美国大陆少雨 (最多减少 20%, 即 0.1 ~ 0.3 mm/d), 气温升高 0.25 ~ 0.75  $^{\circ}\text{C}$ , 河流流量也相应减少。而其对欧洲的影响相对比较弱, 夏季欧洲西部降水增多 (增加 5% ~ 15%, 即 0.1 ~ 0.3 mm/d), 表面气温在四季都存在正异常。Sutton 等<sup>[16-17]</sup> 利用大气环流模式进行模拟, 结果表明, 在 AMO 的正位相期间, 夏季 (JJA) 对应着两个低压异常中心, 一个位于北美南部, 另一个位于欧洲西部, 这两个低压异常中心的存在与美国夏季降水减少有着密切的联系; 在冬季 (DJF) 低压中心转移到海洋上, 一个中心位于北大西洋, 另一个从格陵兰海跨越白令海峡一直延伸到欧洲北部, 这里的气压异常影响了美国大陆的冬季增温, 而欧洲大陆的温度正异常可能与暖的北大西洋 SST 有关。

巴西东北地区的降雨有着显著的季节性, 冬 (DJF)、春季 (MAM) 是雨季, 全年降水约 60% 都发生在春季, 夏季降水很少, 呈干旱状态。由于该地区

的特殊地理位置,其降水受赤道辐合带(IICZ)的直接影响,冬、春季节 IICZ直接影响巴西东北部区域,所以其降水多。到了夏季, IICZ位置北移,所以降水很少。研究发现,北大西洋海温异常与巴西东北部地区的春季降水存在显著的负相关<sup>[5,32-35]</sup>。Folland等<sup>[32]</sup>通过观测以及模式模拟验证了这一点,当热带大西洋增暖时,巴西东北部春季降水会显著减少,观测分析的降水减少量可达 11%。Knight等<sup>[5]</sup>提出,北大西洋海温的增暖(AMO 暖位相)对应着热带大西洋上空雨带的北移,同时会增加跨赤道向北的风场异常,这也就是 IICZ位置的北移,从而减少了该地区春季降水,导致干旱。

非洲西部与巴西东北部类似,其降水也具有季节性,但是最大降雨出现在夏季(JJA),同样受 IICZ 的直接影响。当 AMO 处于暖位相, IICZ 位置北移,给西非地区带来更多的夏季降水,即 AMO 与西非降水呈正相关<sup>[5,27,32,36-37]</sup>。

北大西洋飓风多发生在 8—10 月,其主要发生区域(MDR)位于大西洋 10~20°N。由于飓风带来的严重危害,关于大西洋海温对其影响已有很多的研究<sup>[5,27,38-39]</sup>。模式模拟和观测分析都得到相似的结果,北大西洋海温的升高与飓风数量呈现很好的正相关。AMO 的暖(正)位相,MDR 上空风场的垂直切变减弱,有利于飓风的产生和维持<sup>[38]</sup>,同时海温的升高也为飓风提供了更多的能量补给。

AMO 和 ENSO 尽管都是海温的异常变化,但不同的是:AMO 是年代际尺度上的,而 ENSO 是年际尺度上的。已有研究表明,AMO 对 ENSO 变率起到一定的调制作用<sup>[4,16,40-41]</sup>。Dong 等<sup>[41]</sup>提出,当北大西洋增暖(即 AMO 的暖位相)时,ENSO 的变化幅度将减小。关于大西洋 SST 变化如何影响 ENSO,一方面是通过大气传播,Sutton 等<sup>[16]</sup>认为,热带大西洋的海温增暖释放出大量潜热并通过大气的 Rossby 波传送到太平洋,从而影响 ENSO;另一方面是通过海洋内部热盐环流的作用<sup>[42]</sup>。

### 3 AMO 与我国未来几十年气温趋势

白爱娟等<sup>[43]</sup>指出,影响我国的气候变化,除了温室气体等人为因素外,更主要的是海温和大气环流等自然气候变化。AMO 是气候系统的一个自然变率,知道 AMO 的变化趋势,就可以预测未来气候趋势。图 1b 中点线给出了温度的变化趋势,实线显示的是中国(90~125°E, 22.5~45°N)表面温度异常的变化;虚线是去掉趋势之后的中国表面气温的

变化曲线。由图可见,在 100 a 内中国地区的表面温度增加了约 0.6 °C;中国地区表面温度的变化呈现与 AMO 指数一致的变化趋势,二者的相关系数高达 0.6。这一结果与图 3 的模式结果是一致的。因此,当 AMO 处于暖位相时,我国的气温会上升,当这种影响与温室气体排放引起的变暖趋势叠加时,将加重温室气体排放引起的气候变暖;当 AMO 转入负位相时,则相反,会削弱甚至逆转温室气体排放对我国的增暖作用。

因为全球增暖在冬季最为显著,下面就冬季情况进行详细讨论。从图 2a 可以看到,AMO 引起的我国冬季增温幅度为 0.3~0.8 °C。再分析图 1b 虚线,即去掉趋势后的中国表面气温的变化曲线,发现其振幅为 0.6 °C,与 AMO 引起我国冬季增温最大幅度非常接近,其周期变化与 AMO 也是基本一致的。这就说明中国冬季气温变化主要是温室气体强迫和 AMO 的影响二者叠加的结果。从 AMO 的周期规律来看,目前 AMO 处于暖位相盛期,在未来 15~20 a 内,AMO 虽然还处于暖位相但将逐渐减弱并过渡到平均态,其对中国气温的影响也将相应减弱,中国冬季气温在温室气体和 AMO 的共同作用下还将继续增温,但是增速与 20 世纪 90 年代至今相比要变缓。从 21 世纪 20 年代中期开始,AMO 将进入冷位相,冷的 AMO 将使得我国冬季气温降低 0.3~0.8 °C;假如温室效应产生的增暖趋势保持固定不变,即在 100 a 增幅 0.6 °C 的情形下,至 2050 年左右,温室气体引起的增温(相比 2000—2010 年平均)将达到 0.24 °C,这一温室气体引起的增暖幅度将小于 AMO 冷位相引起的降温幅度。这意味着我国气温从现在开始至 21 世纪 20 年代中期以前还将继续增加,但增速将小于过去的 20 a。21 世纪 20 年代中期以后,增速将迅速减弱,甚至逆转成变冷,变冷幅度相对于目前最大可达到 -0.55 °C。

应该指出的是,我国气温的变化是复杂的,受到多方面因素的影响。除了 AMO 外,可能还有其他自然因素,这些都给气候预测带来困难。不过有一点可以肯定,当 AMO 进入冷位相时,将会削弱温室气体的增暖效应。施能等<sup>[44]</sup>发现北半球表面气温与东亚季风指数的相关也存在显著的年代际变化,同时指出北半球增暖时,夏季风会显著增强,冬季风略微减弱。那么,我国未来气温的变化必然会影响到季风,有非常重要的科学意义和实用价值。

### 4 小结

本文综合评述了 AMO 以及它对全球气候的影

响,重点讨论了对亚洲季风区气候的影响。它对全球的气候影响表现在以下几个方面:

(1) AMO 的暖 (正) 位相会使得欧亚大陆增暖,并存在于各个季节,从而增强了东亚夏季风,减弱东亚冬季风;对于南亚地区最显著的影响是增加夏季 (JJA)、秋季 (SON) 降水。

(2) AMO 的暖 (位相) 对应着美国大陆夏季严重少雨,气温升高;而欧洲西部地区四季都出现增温状态,且降水有所增加。

(3) 北大西洋海温的正异常会导致 ITCZ 的位置北移,从而影响西非和巴西东北部地区的降水,使得巴西东北部地区在春季 (MAM) 降水显著减少以致提早进入干旱期,而在夏季 (JJA) 却增加了西非的降水,一定程度上缓解了当地的干旱情况。

(4) 与 AMO 暖位相有关的北大西洋热带海温的异常升高会增强大西洋飓风的强度以及频率。

(5) AMO 对 ENSO 具有调制作用。暖位相 AMO 倾向于减弱 ENSO 强度。

AMO 对于亚洲季风气候影响的研究目前虽然有了一定的进展,但还有诸多不清楚的问题。在观测资料上,由于 AMO 的长周期特征决定了必须有长时间尺度的可靠观测资料来验证,而目前仅有的资料是时间长度为一百多年的气象资料,如果能有更长时间甚至千年尺度的可靠古气候资料将极大提高 AMO 变化及其气候影响研究的确定性,并为未来气候预测提供科学依据;在机制研究方面,目前关于 AMO 影响亚洲气候的主要机制被认为,大西洋海温异常增暖加热了北半球对流层中高层,从而使得欧亚大陆增温,在夏季加强了海陆热力差异,增强夏季风,冬季正好相反,减弱了冬季风。但是大西洋海温是如何影响对流层中高层,这一环节还没有很明确的解释。此外,真正影响亚洲气候的是大西洋的热带区域还是热带外区域,还是二者的共同作用结果目前虽有单模式结果<sup>[29]</sup>,但这一问题还不清楚,这就需要利用模式分区域进行模拟,以便更深入地研究北大西洋不同地区海温对于气候强迫的侧重点,并对机理进行深入讨论。

对于未来气候的预测无疑是重要的,对于 AMO 这种具有年代际尺度、暖冷位相交替变化的过程,要确定冷暖位相转变的时间就变得尤为重要。目前存在一定的困难:在观测上缺乏更长时间尺度的气候资料;在模式模拟上,准确模拟出气候转变又是其一大难点,这就为实现全面预测带来限制。然而近来有关 AMO 的古气候重建的研究给我们带来了希

望,通过古气候资料的千年时间序列分析获得其概率分布方程,以更好计算未来气候转变的概率情况<sup>[45-46]</sup>。

本文利用 AMO 的周期特征对我国未来几十年的气温做了预测,估计在未来的 10~15 a,我国的气温趋势将变缓,且在 21 世纪 20 年代中期后更是如此,甚至进入冷期。但是这一工作还较粗糙,还有待于进一步验证。

观测资料的充实、模式的改进以及古气候资料重建的加入为 AMO 的研究带来了更多有效途径,对更好地了解人类活动和自然变率各自在全球气候变暖中的作用将有重要意义。

致谢:感谢中国海洋大学罗德海教授的支持,特别感谢黄刚研究员对本工作的支持和帮助。

## 参考文献:

- [1] Trenberth K, Solomon A. The global heat balance: Heat transports in the atmosphere and ocean [J]. *Climate Dyn*, 1994, 10: 107-134.
- [2] Ganachaud A, Wunsch C. Improved estimates of global ocean circulation, heat transport and mixing from hydrographic data [J]. *Nature*, 2000, 408: 453-457.
- [3] Zhang R, Delworth T. Simulated tropical response to a substantial weakening of the Atlantic thermohaline circulation [J]. *J Climate*, 2005, 18: 1853-1860.
- [4] Delworth T L, Mann M E. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere [J]. *Climate Dyn*, 2000, 16: 661-671.
- [5] Knight J R, Folland C K, Scaife A A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L17706, doi: 10.1029/2006GL026242.
- [6] 周天军, 王绍武. 20 世纪北大西洋温盐环流的年代际变化试评估 [J]. *气候与环境研究*, 2001, 6 (3): 294-304.
- [7] Wood R A, Vellinga M, Thorpe R B. Global warming and thermohaline circulation stability [J]. *Philos Trans Roy Soc London*, 2003, 361: 1961-1975.
- [8] Lu R, Dong B. Response of the Asian summer monsoon to weakening of Atlantic Thermohaline Circulation [J]. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25 (5): 723-736.
- [9] Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. Observations: Surface and atmospheric climate change [R] // Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate change 2007: The physical science basis* Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 236-336.
- [10] Cubasch U. Projections of future climate change [R] // Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2001: The Physical Science Basis* Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 527-578.
- [11] Bjerknes J. Atlantic air-sea interaction [J]. *Advances in Geophysics*, 1964, 10: 1.
- [12] Folland C K, Parker D E. Observed variations of sea surface temperature [C] // Schlesinger M E. *Climate-Ocean Interaction* Klu-

- wer, 1990: 21-52
- [13] Kushnir Y. Interdecadal variations North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions [J]. *J Climate*, 1994, 7: 141-157.
- [14] Schlesinger M, Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65—70 years [J]. *Nature*, 1994, 367: 723-726.
- [15] Mann M, Park J. Global-scale modes of surface temperature variability on interannual to century timescales [J]. *J Geophys Res*, 1994, 99: 25819-25833.
- [16] Sutton R T, Hodson D L R. Climate response to basin-scale warming and cooling of the North Atlantic Ocean [J]. *J Climate*, 2007, 20: 891-907.
- [17] Sutton R T, Hodson D L R. Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate [J]. *Science*, 2005, 309: 115-118.
- [18] Enfield D B, Mestas-Nunez A M, Trimble P J. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U. S. [J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28 (10): 2077-2080.
- [19] Kerr R. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries [J]. *Science*, 2000, 288: 1984-1986.
- [20] Wang Y, Li S, Luo D. Seasonal response of Asian monsoonal climate to the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *J Geophys Res*, 2009, 114, D02112, doi: 10. 1029/2008JD010929.
- [21] Li S, Bates G T. Influence of the Atlantic multidecadal oscillation on the winter climate of East China [J]. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24 (1): 126-135. doi: 10. 1007/s00376-007-0126-6
- [22] 曲金华,江志红,谭桂容,等. 冬季北大西洋海温年际、年代际变化与中国气温的关系 [J]. *地理科学*, 2006, 26 (5): 557-563.
- [23] 严厉,王盘兴,管兆勇,等. 大洋间海表温度遥联与中国冬季气温的关系 [J]. *气象科学*, 2008, 28 (2): 133-138.
- [24] 杨晓苑,王盘兴,覃军,等. 大洋间 SST遥联与亚太夏季风异常的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 2007, 30 (2): 194-200.
- [25] Lu R, Dong B, Ding H. Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L24701, doi: 10. 1029/2006GL027655.
- [26] 董敏,何金海,徐海明. 江淮入梅的年际变化及其与北大西洋涛动和海温异常的联系 [J]. *气象学报*, 2001, 59 (6): 694-706.
- [27] Zhang R, Delworth T L. Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L17712, doi: 10. 1029/2006GL026267.
- [28] Goswami B N, Madhusoodanan M S, Neema C P, et al A physical mechanism for North Atlantic SST influence on the Indian summer monsoon [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L02706, doi: 10. 1029/2005GL024803.
- [29] Feng S, Hu Q. How the North Atlantic Multidecadal Oscillation may have influenced the Indian summer monsoon during the past two millennia [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L01707, doi: 10. 1029/2007GL032484.
- [30] Li S, Perwitz J, Quan X, et al Modelling the influence of North Atlantic multidecadal warmth on the Indian summer rainfall [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L05804, doi: 10. 1029/2007GL032901.
- [31] Rajeevan M, Sridhar L. Inter-annual relationship between Atlantic sea surface temperature anomalies and Indian summer monsoon [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L21704, doi: 10. 1029/2008GL036025.
- [32] Folland C K, Colman A W, Rowell D P, et al Predictability of northeast Brazil rainfall and real-time forecast skill, 1987—98 [J]. *J Climate*, 2001, 14: 1937-1958.
- [33] Rowell D P, Folland C K, Maskell K, et al Variability of summer rainfall over tropical North-Africa (1906—92) observations and modelling [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1995, 121: 669-704.
- [34] Hastenrath S, Greischar L. Circulation mechanisms related to northeast Brazil rainfall anomalies [J]. *J Geophys Res*, 1993, 98: 5093-5102.
- [35] Moura A D, Shukla J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model [J]. *J Atmos Sci*, 1981, 38: 2653-2675.
- [36] Rowell D P. The impact of Mediterranean SSTs on the Sahelian rainfall season [J]. *J Climate*, 2003, 16: 849-862.
- [37] Rowell D P, Folland C K, Maskell K, et al Modelling the influence of global sea-surface temperatures on the variability and predictability of seasonal Sahel rainfall [J]. *Geophys Res Lett*, 1992, 19: 905-908.
- [38] Goldenberg S B, Landsea C W, Mestas-Nunez A M, et al The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications [J]. *Science*, 2001, 293: 474-479.
- [39] McCabe G J, Palecki M A, Betancourt J L. Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2004, 101: 4136—4141.
- [40] Dong B, Sutton R T. Adjustment of the coupled ocean-atmosphere system to a sudden change in the Thermohaline Circulation [J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29, doi: 10. 1029/2002GL015229.
- [41] Dong B, Sutton R T, Scaife A A. Multidecadal modulation of El Niño—Southern Oscillation (ENSO) variance by Atlantic Ocean sea surface temperatures [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L08705, doi: 10. 1029/2006GL025766.
- [42] Timmermann A, An S, Krebs U, et al ENSO suppression due to weakening of the North Atlantic Thermohaline Circulation [J]. *J Climate*, 2005, 18: 3122-3139.
- [43] 白爱娟,翟盘茂. 中国近百年气候变化的自然原因讨论 [J]. *气象科学*, 2007, 27 (5): 584-590.
- [44] 施能,鲁建军,朱乾根. 东亚冬、夏季风百年强度指数及其气候变化 [J]. *南京气象学院学报*, 1996, 19 (2): 168-177.
- [45] Gray S T, Graumlich J L, Betancourt J L, et al A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 A. D. [J]. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L12205, doi: 10. 1029/2004GL019932.
- [46] Enfield D B, Luis Cid-Serrana. Projecting the risk of future climate shifts [J]. *Int J Climatol*, 2006, 26: 885-895.

(责任编辑:倪东鸿)