

宫湛秋,孙诚,李建平,等.2019.基于信息流理论的因果分析在辨析大西洋多年代际振荡物理机制中的应用[J].大气科学,43(5): 1081-1094. GONG Zhanqiu, SUN Cheng, LI Jianping, et al. 2019. The Application of Causality Analysis Based on the Theory of Information Flow in Distinguishing the Atlantic Multi-decadal Oscillation Driving Mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(5): 1081-1094, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18181

基于信息流理论的因果分析在辨析大西洋多年代际振荡物理机制中的应用

宫湛秋¹ 孙诚¹ 李建平^{1,2} 冯娟¹ 谢飞¹ 杨韵¹ 薛佳庆³

1 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室和全球变化与地球系统科学研究院,北京 100875

2 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室,青岛 266237

3 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

摘要 大西洋多年代际振荡(AMO)是指发生在北大西洋的海表温度(SST)冷暖异常多年代际(50~80年)振荡的现象。通常AMO被认为是受大西洋经向翻转环流(AMOC)及其对应的海洋动力过程(经向热量输运)的影响。近年来有观点认为,AMO是大气随机热力强迫的产物,大气主导了海气间的热量交换进而影响AMO。弄清AMO和北大西洋海表热通量的因果关系是辨析AMO动力和热力驱动机制的关键。本文利用基于信息流理论的因果分析方法,研究了1880年以来观测的AMO与北大西洋海表热通量间的因果关系。结果表明,在多年代际尺度上,从AMO到海表热通量的信息流要远大于二者相反方向的信息流,这说明AMO是北大西洋海表热通量异常的因,海洋主导了海气间的热量交换。大气随机热力强迫机制无法解释AMO与热通量两者因果分析的结果。对泛大西洋地区的陆地气温和AMO指数进行分析,进一步表明由于海洋主导了海气热量交换,AMO的海温异常加热/冷却控制了绝大多数地区气温的多年代际变化。利用海温驱动的大气环流模式的模拟结果验证了AMO的海温异常对周边陆地气温强迫作用。本文的结果为辨析AMO的动力和热力驱动机制提供了新线索,进一步表明AMO并非是大气随机热力强迫的产物,海洋环流可能是AMO的主要驱动因子。

关键词 AMO(大西洋多年代际振荡) 信息流 因果关系 热通量 陆地气温距平

文章编号 1006-9895(2019)05-1081-14 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18181

The Application of Causality Analysis Based on the Theory of Information Flow in Distinguishing the Atlantic Multi-decadal Oscillation Driving Mechanism

GONG Zhanqiu¹, SUN Cheng¹, LI Jianping^{1,2}, FENG Juan¹, XIE Fei¹,
YANG Yun¹, and XUE Jiaqing³

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology and College of Global Change and Earth System Science,
Beijing Normal University, Beijing 100875

2 Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology,
Qingdao 266237

收稿日期 2018-06-27; 网络预出版日期 2018-11-30

作者简介 宫湛秋,女,1995年出生,硕士研究生,主要从事大西洋多年代际变化研究。E-mail: 201721490006@mail.bnu.edu.cn

通讯作者 孙诚, E-mail: scheng@bnu.edu.cn

资助项目 全球变化与海气相互作用专项GASI-IPOVAI-06、GASI-IPOVAI-03, 国家自然科学基金项目41775038

Funded by the National Program on Global Change and Air-Sea Interaction (Grants GASI-IPOVAI-06, GASI-IPOVAI-03), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 41775038)

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

Abstract Atlantic Multi-decadal Oscillation (AMO) is the average sea surface temperature (SST) over the entire North Atlantic after the long-term warming trend is removed. In the reconstruction of North Atlantic SST from the mid-1800s to present, the basin-wide mean time series appears to oscillate with a period of 50–80 years. One of the most accepted theories is that the AMO is primarily driven by variation in the strength of Atlantic meridional overturning circulation (AMOC). Recently, the atmosphere-forced thermodynamics for the AMO has been proposed. There is a clear need to figure out the causality between AMO and North Atlantic surface heat flux and it may provide a key feature to distinguish the AMO mechanisms. We use a newly developed technique that is based on the information flow concept to investigate the causal structure between the North Atlantic surface heat flux and the observed AMO from the mid-1800s. Our study shows one-way causality between North Atlantic surface heat flux and AMO. It is confirmed that the AMO is the main causal driver of the North Atlantic surface heat flux, which means ocean dynamics mainly dominates heat transport between ocean and atmosphere. The stochastic atmosphere-forced thermodynamics mechanism cannot explain the results. The results between the AMO and land surface air temperature further prove that the AMO dominates the North Atlantic surface heat flux transport. We conduct a SST forced ATL_VAR_AGCM experiment, and the results of the five ensemble members from the experiment verified the direct impact of the Atlantic SST forcing on land surface air temperature. The results of this study provide a new clue to distinguish the AMO mechanisms and further show that, instead of atmosphere-forced thermodynamics mechanism, ocean circulation may mainly drive the AMO.

Keywords AMO (Atlantic Multi-decadal Oscillation), Information flow, Causality, Heat flux, Anomalies of land air temperature

1 引言

大西洋多年代际振荡 (Atlantic Multi-decadal Oscillation, AMO) 是以北大西洋为中心的海表温度 (SST) 异常的一种多年代际尺度 (65 年至 75 年) 振荡。海表温度的变化幅度约为 0.4°C，在空间上表现为海盆一致型的海温异常，而时间上表现为大西洋海表温度在 1860 年至 1880 年以及 1930 年至 1960 年期间为暖位相，而在 1905 年至 1925 年以及 1970 年至 1990 年期间为冷位相。大西洋多年代际变率 (Atlantic Multi-decadal Variability, AMV) 实际上和 AMO 是同一个物理实体 (Ting et al., 2009)，为了简明起见，这里不对 AMO 和 AMV 作区分，下文将使用 AMO 来代表大西洋的多年代际振荡/变率。

AMO 是全球气候变率最重要的模态之一，对全球和区域气候有显著影响。已有的观测和古气候记录以及气候模式的研究表明，AMO 的自然波动与大西洋周边地区的气候存在很好的相关性，在大西洋、北美、欧洲和非洲以及北极地区相关性显著 (李双林等, 2009)。AMO 与大西洋飓风活动密切相关，在 20 世纪 70 年代的 AMO 负位相期间大西洋飓风活动明显减弱 (Zhang and Delworth, 2006)。

在西非地区，其降水的年代际变化与 AMO 有着强烈的相关关系，AMO 还被认为与撒哈拉地区的干旱相关，AMO 正位相会导致撒哈拉地区降水显著减少 (Zhang and Delworth, 2006; Mohino et al., 2016)。AMO 对中国大陆的降水量和气温有重要影响 (Enfield et al., 2001; McCabe et al., 2004)。在 AMO 正位相期间，欧洲西部夏季气温异常升高，北欧部分地区降水异常增多，同时欧洲地区的陆地气温存在全年的正异常 (Sutton and Hodson, 2005; Knight et al., 2006; Sutton and Dong, 2012)。北极地区温度的年代际变化与 AMO 也存在明显的相关关系 (Chylek et al., 2009, 2012)。此外，还有研究表明 AMO 会对亚洲及邻近地区的气候产生影响 (Lu et al., 2006; Li and Bates, 2007; 王彦明等, 2010; 李双林等, 2015; 罗菲菲和李双林, 2015; Sun et al., 2017a, 2017b)。从这些研究中可以看出 AMO 对气候的影响已经扩展到欧亚大陆的大部分地区，其主要的影响机制是 AMO 通过对对流层中上层的加热/冷却作用，引起大气环流异常，进而影响欧亚大陆气温的变化 (O'Reilly et al., 2017)。

尽管 AMO 对全球气候有着深远的影响，但 AMO 的驱动机制依然没有定论。为了解释形成 AMO 的来源，国内外研究者提出了许多可能的机

制, 包括外部强迫 (Otterå et al., 2010; Booth et al., 2012; Zhang et al., 2013; Bellucci et al., 2017) 和内部低频动力因素。现在大部分观点认为 AMO 主要是由大西洋经向翻转环流 (AMOC) 强度的变化主导的 (Knight et al., 2005; 于雷等, 2010)。随着 AMOC 的加强 (减弱), 大西洋向北的海洋热量输送增加 (减少), 导致 AMO 正 (负) 位相的形成。基于这一理论, AMO 可以被解释为海洋动力的结果, 即气候变率的内部模态。由于观测记录太短, 很难在年代际尺度上解释 AMO 和 AMOC 的直接联系。然而, 通过使用一些能表征 AMOC 强度的因子, 比如 400 米处温带次表层温度的主导模态、海水密度、海平面梯度、海洋上层热含量和副极地海表盐度等, 能够支持 AMOC 和 AMO 之间联系的观测证据逐渐增加。同时, 一些研究者提出了动力学机制解释 AMOC 和 AMO 的多年代际准周期变化, 比如, 由随机大气强迫引起的动力学海洋过程产生的自维持或阻尼振荡。Sun et al. (2015) 发现 NAO 通过海表风应力强迫导致 AMOC 发生变化进而形成 AMO 的海表温度异常; AMO 对 NAO 存在延迟的负反馈效应, 这种负反馈是通过海表热通量影响大气环流。基于这些物理过程, 他们提出了“大西洋年代际海气耦合延迟振子”理论模型, 解释了 NAO 和 AMO 的多年代际准周期振荡。

近来 Clement et al. (2015) 提出大气强迫的热力机制来解释 AMO, 挑战了与 AMOC 有关的海洋动力驱动机制。他们分析了耦合模式比较计划第三阶段 (CMIP3) 中平板海洋模式 (SOM, 50 米深混合层海洋模式) 模拟的大西洋 SST 多年代际变率, 在 SOM 中只考虑大气和海洋的热耦合, 不考虑海洋环流变化和相关的海洋热量输送作用。他们将结果与完全耦合的模式模拟和 SST 观测结果进行了比较, 并指出 SOM 在没有海洋环流的作用情况下能再现 AMO 的主要特征。这一研究结果表明 AMO 主要是北大西洋 SST 对随机大气强迫的直接响应, 因此所涉及关键物理过程很大程度上可以被解释为一个红噪音过程。与大气随机热力强迫机制的观点相反, Zhang et al. (2016) 发现, 包含海洋动力过程的完全耦合模式可以正确再现观测到的年代际尺度上北大西洋向下净表面热通量和海表温度异常之间的负相关关系 (Gulev et al., 2013), 而 SOM 却不能模拟这一观测到的现象。这表明

在长时间尺度上表面温度和热通量是由海洋环流驱动的。随后的一些研究 (Drews and Greatbatch, 2016; O'Reilly et al., 2016; Zhang, 2017) 进一步认为这种负相关是判别 AMO 驱动机制的一个关键特征, 进而利用这一特征来区分海洋动力和大气热力强迫的相对作用, 并最终证明海洋环流动力驱动机制的核心地位。尽管如此, Clement et al. (2016) 和 Cane et al. (2017) 却指出低频上净表面热通量和海表温度异常的相反关系是海洋动力作用与大气热力强迫在长时间尺度上近平衡的结果, 两者的相关不能作为区分 AMO 强迫来源 (大气还是海洋) 的依据。

热通量是海气热量交换的指标, 也是 AMO 的海洋动力驱动机制的直接观测证据 (Gulev et al., 2013)。Zhang et al. (2016) 用相关分析探讨热通量与 AMO 的关系并指出海洋环流动力驱动是 AMO 的主因。Cane et al. (2017) 则认为温度升高时海洋失去热量并不能说明海洋环流驱动 AMO, 而是一个必然结果, 相关性不能反映因果关系。因此, 从上面的回顾中不难看出, 弄清 AMO 和北大西洋海表热通量的因果关系是辨析 AMO 动力和热力驱动机制的关键。

要研究两个事件之间的因果关系, 通常采用超前滞后相关分析, 但是相关关系中两个事件平等, 无法知道因果。这也正是 Cane et al. (2017) 认为相关不能反映因果关系的一个重要原因 (Clement et al., 2015, 2016)。当两个事件是相关关系时很难区分两者的相对优势。因果性和相关性是经常被混淆的两个不同概念, 如果一个现象 A 和另一个现象 B 之间存在因果关系, 那么他们随时间的演化一定具有相关性, 然而两个现象之间存在相关性并不意味着他们之间具有因果关系, 受同一外部因素的两个独立个体往往具有很强的相关但却不一定存在因果关系。为了解决这个问题, Liang (2014) 引入 Liang-Kleeman 信息流理论, 使得因果关系在数学与物理上严格化, 能够在尚不清楚两个现象之间的动力过程情况下, 仅通过两个时间序列的相关系数来计算它们之间的信息流, 就能最终确定两个现象之间的因果关系。该方法已成功地应用到了不同的实际问题中。Liang (2014) 使用因果分析方法成功解释了印度洋偶极子 (IOD) 和厄尔尼诺之间的因果关系, 研究表明厄尔尼诺倾向于稳定 IOD, 而

IOD 的作用是使厄尔尼诺更加不确定。对于厄尔尼诺来说，印度洋是不确定性的来源，从 IOD 到厄尔尼诺的因果关系表现为不确定性从前者传播到后者。随后，Stips et al. (2016) 使用这一方法研究自 1850 年以来全球辐射强迫与全球年平均表面温度异常之间的因果关系。全球温度变率与温室气体之间的反馈机制不明确，二氧化碳浓度的增加与表面温度的升高之间的高度相关性不足以证明温室气体浓度增加导致辐射强迫增加是全球变暖的原因。因果分析方法的研究明确显示了在近百年的时间尺度上，温室气体与全球年平均表面温度异常之间的单向因果关系，确认了以二氧化碳为主的温室气体浓度增加是全球变暖的主要因素。而在古气候时间尺度上，温度的变化导致二氧化碳的浓度变化。本文采用这一因果关系分析方法，厘清 AMO 与表面热通量及北大西洋沿岸陆地气温的因果关系，从而确认在年代际尺度上究竟是大气还是海洋主导了海洋和大气间的热量交换，最终帮助我们理解 AMO 的物理驱动机制。

2 数据和方法

2.1 数据

本文使用的 AMO 指数是通过对大西洋地区 $35^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 海表温度异常月数据进行平均计算得出的 (1880~2007 年)，尽管这一区域与之前用于量化 AMO 指数的区域不同，但该区域基于海温所得出的 AMO 指数与 NOAA 的 AMO 指数 (1901~2007 年) (Enfield et al., 2001) 高度相关并且呈现很强的多年代际变率，许多研究也采用过类似的定义方法 (Zhang et al., 2016; O'Reilly et al., 2017)，并且我们计算了整个北大西洋平均海温异常的 AMO 指数 (1880~2007 年) 与年平均热通量和陆地气温距平的信息流分布，发现所得到的结果并不依赖于 AMO 指数定义区域的选择。同时，选择这一区域作为 AMO 指数的主要动机是为了与热通量的数据相对应。分辨率为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 的表面湍流热通量数据是利用国际综合海气数据集 (ICOADS) 1880~2007 年期间的 VOS (Voluntary Observing Ship) 观测报告所重建的 (Gulev et al., 2013)，其中规定热通量向上为正。陆地气温所用的资料为 National Oceanic and Atmospheric Administration, Delaware

version 4.01 (NOAA Delaware v4.01) (Willmott and Robeson, 1995) 和 Climate Research Unit Time-Series version 3.23 (CRU TS v3.23) (Harris et al., 2014) 的陆地气温资料 (1901~2007 年)，分辨率均为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

本文基于年平均序列进行分析。从图 1 可见，所得的结果中 AMO 指数与所描述的 AMO 时间特征一致。我们也可以看出 NOAA Delaware v4.01 和 CRU TS v3.23 的陆地气温资料两者结果相似，因此我们接下来主要展示 CRU TS v3.23 的陆地气温资料所得出的结果。

两个自相关时间序列的线性回归系数和相关性的统计显著性检验是通过使用有效自由度的 *t* 检验得到的 (Sun et al., 2013)， N^{eff} 的有效自由度由下面的近似给出：

$$\frac{1}{N^{\text{eff}}} \approx \frac{1}{N} + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{N-j}{N} \rho_{XX(j)} \rho_{YY(j)} \quad (1)$$

其中， N 是样本大小， $\rho_{XX(j)}$ 和 $\rho_{YY(j)}$ 分别是时间滞后 j 的两个采样时间序列 X 和 Y 的自相关。

我们使用 SPEEDY (Simplified Parametrizations, primitivE-Equation DYnamic) 模式进行数值试验，该模式是中等复杂度的大气环流模式 (Atmospheric General Circulation Model, AGCM) (Kucharski et al., 2016)，其使用简化的物理过程，水平分辨率是 T30 (即约 $3.75^{\circ} \times 3.75^{\circ}$ 水平分辨率)，包含 8 个垂直层。为了研究大西洋海表温度对全球陆地气温的直接强迫效应，我们进行了 SST 强迫 AGCM 的试验。试验中在大西洋给定 HadISST1 产品观测到的逐月变化的 SST 异常，而在其余洋盆 (如印太洋盆) 使用观测到的气候态 SST 的作为大气的下垫面强迫。这个试验被称为 ATL_VAR_AGCM，包含 5 个集合成员。模式从 1872 年开始一直积分到 2013 年。对 ATL_VAR_AGCM 试验中的五个集合成员的在 1900~2013 年结果进行了平均并分析 (Sun et al., 2017a)。

2.2 方法

我们采用 Liang (2016) 的方法来评估时间序列之间的因果关系。因果关系是一个时间序列流向另一个时间序列的信息流动的时间速率。逻辑上，从一个事件到另一个展示了从前者到后者的因果关系的强度，不存在因果关系则信息流动必然为 0。Liang (2014, 2016) 证明信息流实际上

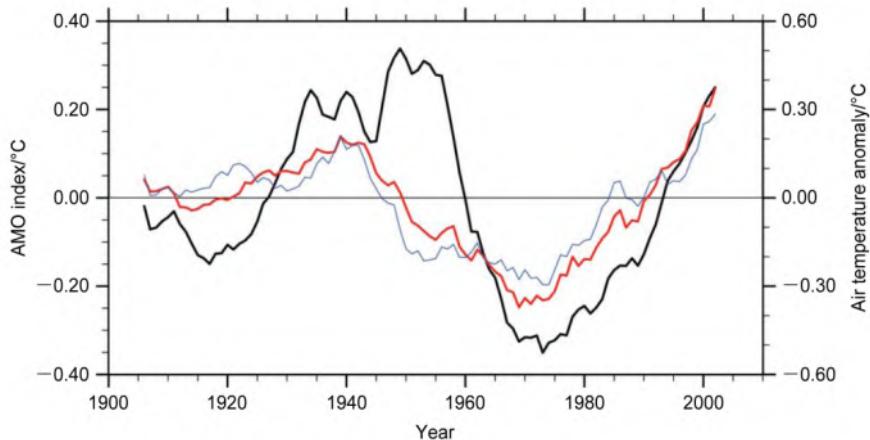


图1 年平均AMO（大西洋多年代际振荡）指数（黑）（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）和来自CRU TS v3.23（蓝）和NOAA Delaware v4.01（红）陆地气温数据集的年平均全球陆地气温距平（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）的时间序列（1901~2007年）

Fig. 1 Time series of annual mean AMO (Atlantic Multi-decadal Oscillation) index (black) (units: $^{\circ}\text{C}$) and anomalies of annual mean global land surface air temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) for the period 1901–2007 from CRU TS v3.23 (blue) and NOAA Delaware v4.01 (red) surface air temperature data sets

可以推导出来。

对于一个动力系统：

$$\frac{du}{dt} = \mathbf{F}(u, t) + \mathbf{B}(u, t)\mathbf{w}, \quad (2)$$

其联合熵 \mathbf{H} 的时间增长率就是向量场 \mathbf{F} 的散度的数学期望加上取决于 Fisher 信息矩阵的耗散：

$$\frac{d\mathbf{H}}{dt} = E(\nabla \cdot \mathbf{F}) + \frac{1}{2} \mathbf{G} : \mathbf{I}, \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{B}\mathbf{B}^T, \quad (4)$$

给定一个二维系统：

$$\frac{dX_1}{dt} = \mathbf{F}_1(X_1, X_2, t) + b_{11}\mathbf{w}_1 + b_{12}\mathbf{w}_2, \quad (5)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \mathbf{F}_2(X_1, X_2, t) + b_{21}\mathbf{w}_1 + b_{22}\mathbf{w}_2, \quad (6)$$

其中， \mathbf{w}_i ($i=1, 2$) 是标准 Wiener 过程向量， b_{ij} 和 \mathbf{F}_i 是关于 X 和 t 的任意函数。从 X_2 传递到 X_1 的不确定性为：

$$T_{2 \rightarrow 1} = -E\left(\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial(\mathbf{F}_1 \rho_1)}{\partial x_1}\right) + \frac{1}{2} E\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2(b_{11}^2 + b_{12}^2) \rho_1}{\partial^2 x_1^2}\right), \quad (7)$$

其中， ρ_1 是 X_1 的边际密度， E 是指数学期望值。如果 X_1 与 X_2 是两个独立的量，那么 $|T_{2 \rightarrow 1}|$ 的值则为 0。当只给出两个时间序列，比如 X_1 和 X_2 ，对两个时间序列 X_1 和 X_2 ，在一个线性模式的假设下，从 X_2 到 X_1 的信息流（不确定性传递）的最大似然估计为一个简洁的形式：

$$T_{2 \rightarrow 1} = \frac{C_{11}C_{12}C_{2,\text{dl}} - C_{12}^2C_{1,\text{dl}}}{C_{11}^2C_{22} - C_{11}C_{12}^2}, \quad (8)$$

其中， C_{ij} 是 X_i 和 X_j 的样本协方差， $C_{i,jl}$ 是 X_i 和 X_j = $\left\{ (X_{j,n+1} - X_{j,n}) / \Delta t \right\}$ 的样本协方差， Δt 为时间步长。

由上面的公式我们可以看出有因果就一定有相关，但有相关不一定有因果。如果 $|T_{2 \rightarrow 1}|$ 不为 0，那么 X_2 是 X_1 的因，反之则两者之间无因果关系。Stips et al. (2016) 指出，如果 $|T_{2 \rightarrow 1}|$ 的值远大于 $|T_{1 \rightarrow 2}|$ 的值且 $|T_{1 \rightarrow 2}|$ 接近于 0，即 $|T_{1 \rightarrow 2}|$ 的值可以被忽略不计时，也可以认为 X_2 是 X_1 的因。如果二者的值相当，则 X_2 和 X_1 互为因果，正值对应的就是不确定性产生源，负值则使之趋于稳定。Liang (2014, 2015) 提出了信息流 T 值显著性检验方法，利用 z 检验的方法检验信息流 T 是否显著区别于 0 并确定出相应的显著性水平。这里我们设置显著性水平为 0.05，进而判别 T 值是否显著。

3 结果

3.1 大西洋表面热通量异常多年代际变化和AMO指数的相关关系

两个量之间如果存在因果关系，那么这两个量就一定相关。但两个量相关，却不一定存在因果关系。因此，相关关系是因果关系的必要条件，要研究 AMO 与大西洋表面热通量的因果关系，首先要

研究二者的关系才能进一步研究因果关系。

图2是AMO与大西洋表面热通量异常值之间相关系数的空间分布，由图可见在中高纬度大西洋表面($40^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$)AMO与大西洋表面热通量异常的相关关系最好，相关系数都在0.7及以上，并且都通过了0.01显著性水平检验。相关性高的区域主要集中在北美东部，格陵兰岛和冰岛南部的洋面上，但靠近陆地上的热通量异常与AMO指数的相关系数并不高，表明AMO主要是与大洋表面的热通量存在较高的相关性。此外，我们还检查了AMO指数与区域平均($30^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{W} \sim 30^{\circ}\text{W}$)的

热通量异常的超前滞后相关，结果表明AMO的变化有超前热通量的特征(图略)。

图3给出了1880年至2007年AMO和大西洋表面热通量(我们选取了图2中相关性较好的大西洋面区域)异常的时间序列，由图可见大西洋表面热通量异常呈现年代际变化的特征，并且与AMO有较好的相关性。大西洋表面热通量距平值变化幅度为 9 W m^{-2} ，在1900至1930年和1960至1990年之间为负位相，1925年至1960年为正位相，超前AMO约5到10年。AMO与大西洋表面热通量距平有较好的位相一致性，相关系数达到0.77，与图2

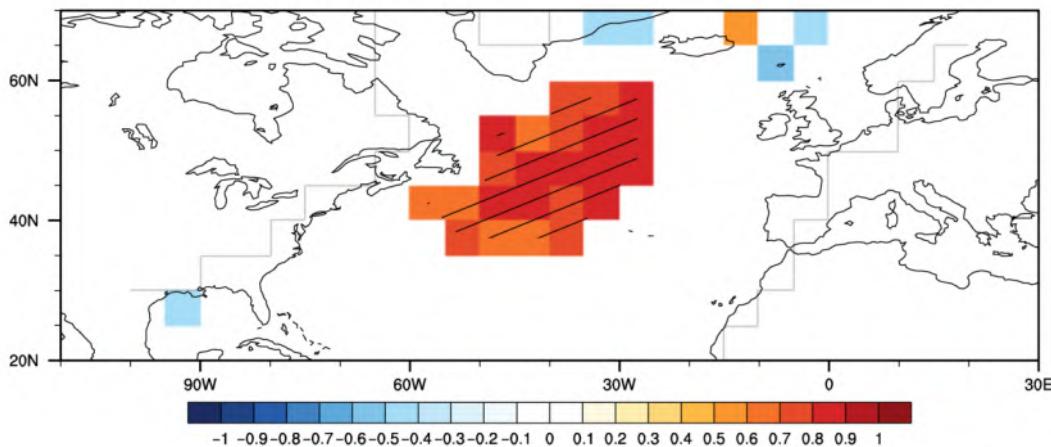


图2 1880~2007年年平均AMO指数和年平均表面热通量距平多年代际变化的相关系数(划线部分表示通过0.01显著性水平检验)

Fig. 2 Multi-decadal correlation coefficient between annual mean AMO index and annual mean surface heat flux anomalies for the period 1880–2007 (Area with black lines indicates 0.01 significance level based on Student t test).

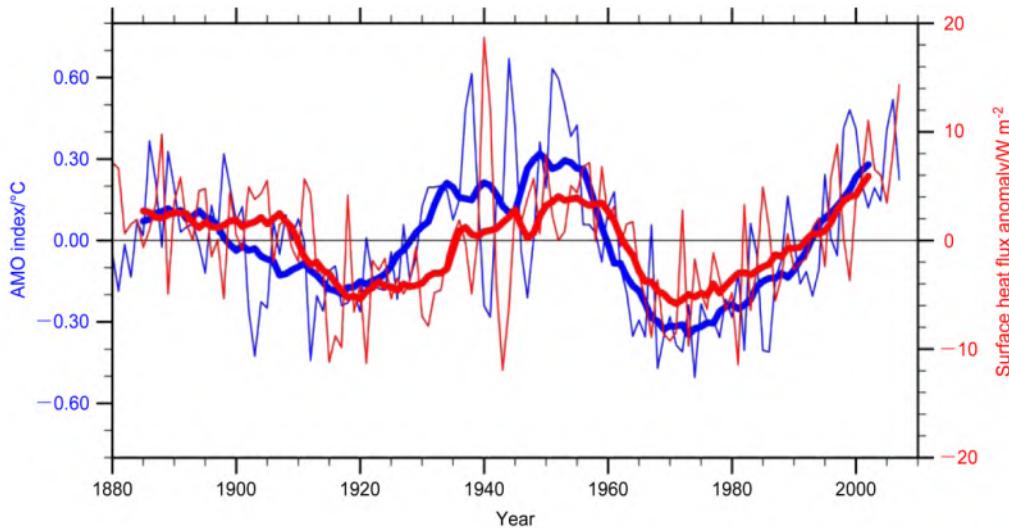


图3 1880–2007年年平均AMO指数(蓝)(单位: $^{\circ}\text{C}$)和大西洋年平均表面热通量距平(红)(单位: W m^{-2})的时间序列，粗线和细线分别表示11年滑动平均和年平均

Fig. 3 Time series of annual mean AMO index (blue, units: $^{\circ}\text{C}$) and anomalies of annual mean surface heat flux (red, units: W m^{-2}) for the period 1880–2007. Thick and thin lines are 11-year running means and annual means, respectively

相对应，即大西洋海表温度异常与其海表面热通量异常在多年代际尺度上的振荡密切相关。

从AMO与表面热通量异常值之间相关系数的分析来看，AMO与大西洋表面的海表热通量在年代际尺度上呈现良好的相关关系，在空间尺度上也与AMO呈现出很好的一致性。此前的许多研究(Gulev et al., 2013; Zhang et al., 2016; O'Reilly et al., 2017)也表明AMO与大西洋表面的海表热通量在年代际尺度上有很好的相关关系，我们所得出的结果与这些研究得出的结果相一致。尽管二者呈现高度的相关，但Cane et al. (2017)指出相关关系并不能反映因果关系，目前也尚没有分析二者因果关系的研究，我们还不能得到有关二者之间因果关系的结论。基于信息流理论的因果分析方法可以用来判别两个物理量之间的因果关系，因此接下来我们将使用这一方法来研究AMO和大西洋海表热通量的因果关系。

3.2 大西洋表面热通量异常多年代际变化和AMO指数的因果关系空间分布

我们针对3.1节中AMO和大西洋表面热通量异常之间相关系数较高的地区进行进一步的因果关系分析。图4是1880~2007年AMO与大西洋表面热通量异常的信息流的空间分布。在相关较好的大西洋表面，AMO流向大西洋表面热通量的信息流的值最大接近0.2，反之大西洋表面热通量流向AMO的信息流数值约为0.002，远远小于前者并且接近于0。由2.2节可知大西洋表面热通量流向AMO的信息流的数值可以被忽略，因此AMO与大西洋表面热通量异常呈现一个基本上是单向的因果关系，信息流的值基本为正值，由此可知AMO是大西洋表面热通量不确定性的主要产生源，即AMO是大西洋表面热通量异常年代际变化的原因。

大气随机热力强迫机制认为AMO主要是北大西洋SST对随机大气强迫的直接响应，大气主导了

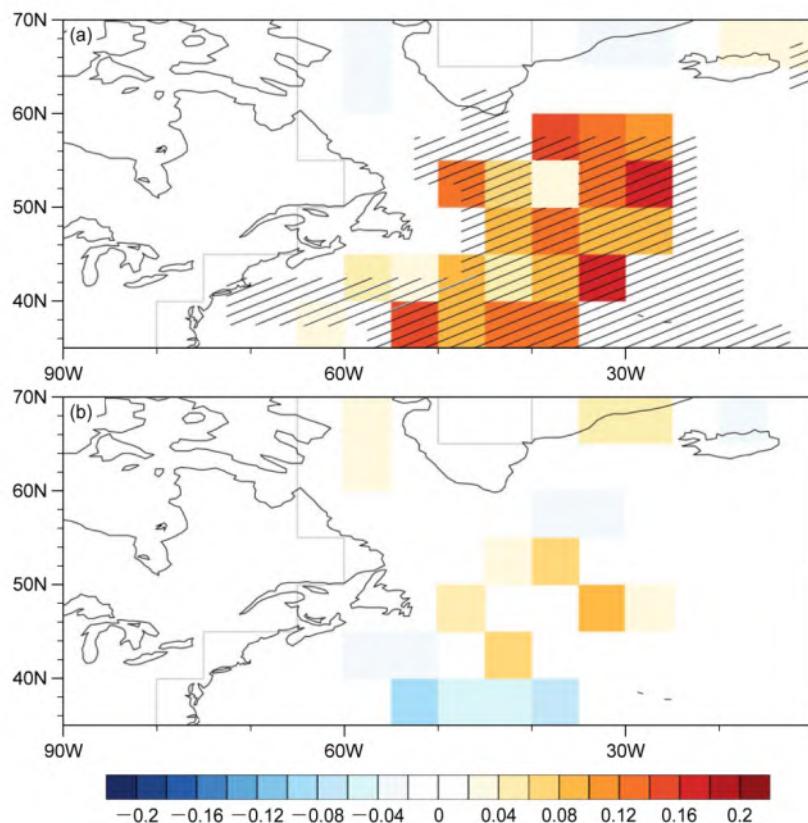


图4 1880~2007年年平均AMO指数和大西洋年平均表面热通量距平信息流的空间分布：(a) AMO到大西洋表面热通量距平的因果(划线部分表示通过0.05显著性水平检验)；(b)大西洋表面热通量距平到AMO的因果

Fig. 4 Spatial patterns of (a) the information flow from the annual mean AMO index to anomalies of annual mean surface heat flux for the period 1880–2007 (area with black lines indicate 0.05 significance level based on z test) and (b) the information flow from anomalies of surface heat flux to the AMO index for the period 1880–2007

海气界面间的热量交换，并且该机制认为净表面热通量和海表温度异常的相关关系并不能作为区分AMO强迫来源（大气还是海洋）的依据。而图4b的结果可见大西洋表面热通量距平到AMO的信息流的值都接近于0，说明大西洋净表面热通量没有直接强迫海表温度的机制，AMO不能直接响应。与相关关系不同，大西洋表面热通量距平与海表温度异常之间的因果关系十分明确，我们得出的结果不能用大气随机热力强迫机制来解释。

在AMO和大西洋表面热通量异常相关系数高的地区，AMO是大西洋表面热通量异常的因，基本上呈现出一个较好的单向因果关系，主要位于大西洋西北部的洋面上，说明在年代际尺度上是海洋主导热量的交换。对观测的海温和热通量进行直接的因果分析有效的解决了此前关于两者的相关不能反映因果的问题（Cane et al., 2017）。这里因果分析的结果与此前AMO与热通量超前滞后相关的分析结果也是对应的。我们的结果表明，在年代际尺度上，海洋主导了海气界面间的热量交换，大气随机热力强迫机制不能解释观测得到的海温和热通量因果关系。我们的结果同时也验证了海洋环流动力驱动的机制，说明AMO并非是大气热力强迫的产物，海洋环流AMOC驱动北大西洋海温的多年代际变化，从而控制北大西洋海气之间的热量交换。

3.3 陆地温度异常多年代际变化和AMO指数的相关关系

热通量是海气热量交换的指标，海气间的热量

交换会影响临近大洋的陆地气温。热通量的变化会通过海气相互作用影响大西洋周边陆地气温的变化。

从3.1节可知表面热通量向上为正，温度升高时，表面热通量会增加，随之洋面上热量会向外辐散，周边地区温度会升高。3.2节表明AMO是大西洋表面热通量异常多年代际变化的因，即海气之间的热量交换是由海洋主导的。年代际尺度上海洋主导了海气界面的热量交换这一观点如果成立，那么大西洋周边陆地气温异常的多年代际变化也会和AMO之间存在因果关系。我们在AMO和大西洋表面热通量异常多年代际变化因果分析的基础上分析AMO和大西洋周边陆地气温异常这二者之间的关系，进一步佐证热通量的结果，也可以确定海洋中的AMO是否是陆地气温变化的主导因子，这对气温的年代际变化归因及预测有重要意义。

因此，下面我们将关注AMO与大西洋表面热通量异常年代际变化的因果关系较好的区域，分析其周边陆地气温异常多年代际变化与AMO之间的关系。

AMO与陆地气温异常的多年代际变化具有显著的相关，尤其是在靠近大西洋以西及以北地区的相关性更显著。图5是1901至2007年大西洋周边地区陆地气温异常与AMO指数之间相关系数的空间分布。从图中可以看出，在靠近北大西洋的北美、格陵兰岛东南部、冰岛和欧洲西部的平均陆地

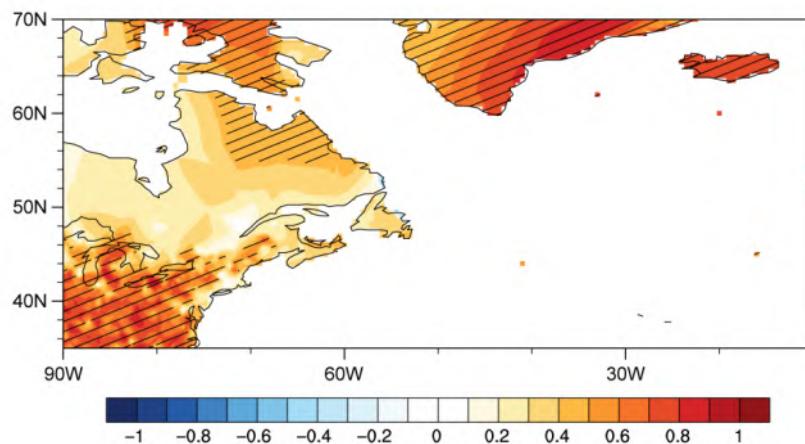


图5 1901~2007年年平均AMO指数和年平均陆地气温距平多年代际变化的相关系数（划线部分表示通过0.01显著性水平检验）

Fig. 5 Multi-decadal correlation coefficient between annual mean AMO index and anomalies of annual mean land surface air temperature for the period 1901–2007 (area with black lines indicate 0.01 significance level based on Student *t* test).

气温异常的多年代际变化与 AMO 相关很好, 局部地区如临近大洋地区的冰岛相关系数接近于 1, 大西洋东部地区如欧洲的相关系数要略低于北美, 与 AMO 指数和表面热通量异常多年代际变化的相关相对应。说明 AMO 指数和大西洋西部和北部地区陆地气温异常多年代际变化有较好的相关, 而西欧地区的相关仅在靠近大洋地区显著, 并且数值略低于冰岛、格陵兰岛等地。

为了更好地了解陆地气温异常多年代际变化的特征, 我们选择图 5 中与 AMO 指数相关性显著的地区的气温距平做时间序列图。从图 6 给出的 1901 至 2007 年 AMO 指数和北美、格陵兰岛和冰岛的年平均陆地气温距平的时间序列可以看出, 陆地气温距平的多年代际变化趋势与 AMO 有较好的相关性, 相关系数分别为 0.72、0.71 和 0.84, 冰岛地区的相关性最高, 北美和格陵兰岛则略低一些, 总体相关系数较高, 说明海气之间密切相关。北美、格陵兰岛和冰岛的年平均陆地气温距平都具有多年代际变化的特征, 可以看出整体上陆地气温距平的多年代际变化趋势与 AMO 相似。在位相变化上, 北美、格陵兰岛、冰岛的陆地气温异常与 AMO 指数在 1960 年和 1990 年左右的位相转折时间相差较小。从温度变化幅度来看则是欧洲地区陆地气温异常的

数值与 AMO 指数相似, 而格陵兰岛、冰岛和北美气温异常变化幅度较大, 冰岛和北美在 0.7°C 左右, 格陵兰岛变化幅度则达到 1°C 左右。总体上, 在多年代际尺度上, 大西洋周边陆地气温异常变化与 AMO 有较好的相关。此外, 我们还检查了 AMO 指数与区域平均 ($30^{\circ}\text{N} \sim 70^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{W} \sim 10^{\circ}\text{W}$) 的大西洋周边陆地气温异常的超前滞后相关, 结果表明 AMO 的变化有超前大西洋周边陆地气温异常的特征(图略)。

AMO 与泛大西洋地区的平均陆地气温异常的多年代际变化在空间和时间尺度上都有着较好的相关关系, 主要在北美东北部、格陵兰岛南部和冰岛, 与热通量和 AMO 相关分析相一致。AMO 与泛大西洋地区的平均陆地气温异常的多年代际变化之间的相关性的研究很多, AMO 与北极地区、欧洲、北美、西非以及亚洲的陆地气温异常的多年代际变化都有很好的相关 (Knight et al., 2006; Chylek et al., 2009; Sutton and Dong; 2012; 史锋等, 2015; O'Reilly et al., 2017)。我们的结果与之前的研究基本上是一致的, 但这些研究并没有进一步分析海温和陆地气温的因果关系, 而两者因果关系的分析可以帮助我们进一步理解大西洋在多年代际尺度上海洋-大气间热量交换的物理过程。因而, 基

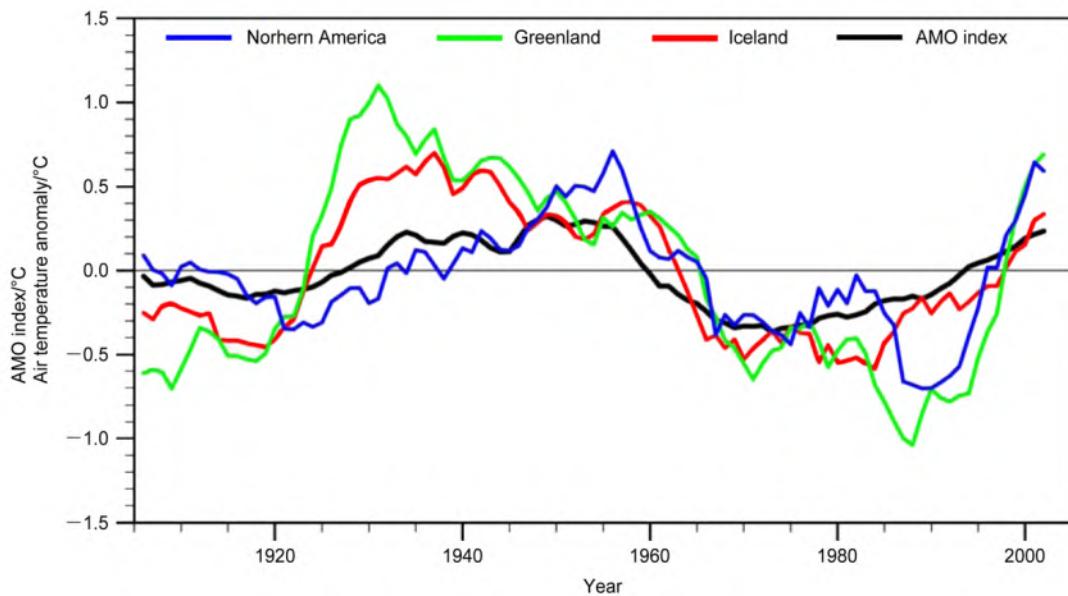


图 6 1901~2007 年年平均 AMO 指数和北美、格陵兰岛和冰岛的年平均陆地气温距平的时间序列 (单位: °C)

Fig. 6 Time series of annual mean AMO index and anomalies of annual mean land surface air temperature in northern America, Greenland, and Iceland (units: °C) for the period 1901–2007

于信息流理论的因果分析方法来研究 AMO 和泛大西洋地区的陆地气温异常的多年代际变化是有必要的。

3.4 陆地温度异常多年代际变化和 AMO 指数的因果关系

在上述的相关分析中，我们针对 AMO 和大西洋周边地区陆地气温距平之间相关系数较高的地区进行进一步的因果关系分析。因果分析的结果表明在 AMO 对大西洋表面热通量有着明显的影响的周边区域，主要是在北美五大湖区域、格陵兰岛西南部和冰岛南部，AMO 对其陆地气温异常有着热力影响，而并不是大气随机强迫的产物。

图 7 是 1901 至 2007 年 AMO 指数和泛大西洋地区陆地气温距平的信息流的空间分布。由图可见，在相关系数高的北美、格陵兰岛和冰岛，因果关系同样很明显。但相较于相关系数的空间分布，因果关系的空间分布范围略有缩小。相关分析中格陵兰

岛东南部和冰岛最为明显，而因果关系的分布上只有格陵兰岛西南部和冰岛南部的单向因果关系明显，格陵兰岛东南部和冰岛北部地区则呈现双向因果关系。由于 AMO 海温异常在副极地北大西洋强度要比中纬度和热带北大西洋要强，所以像格陵兰岛、冰岛这些高纬度地区的响应要更强一些 (Luo et al., 2011)。相关较好的北美地区在因果关系的分布上来看，也仅有五大湖地区和魁北克省东南部地区有较好的单向因果关系，北美东北部大部分地区则都呈现双向因果关系。这一结果验证了有因果关系才会有相关，而有相关并不一定会有因果，也进一步佐证了在年代际尺度上 AMO 是大西洋表面热通量的因，即海洋主导了海气界面的热量交换，因此海洋会对其附近的陆地气温有重要的热力影响。

从因果分析的结果来看，AMO 是泛大西洋地区陆地气温异常多年代际变化的主导因素，具体体

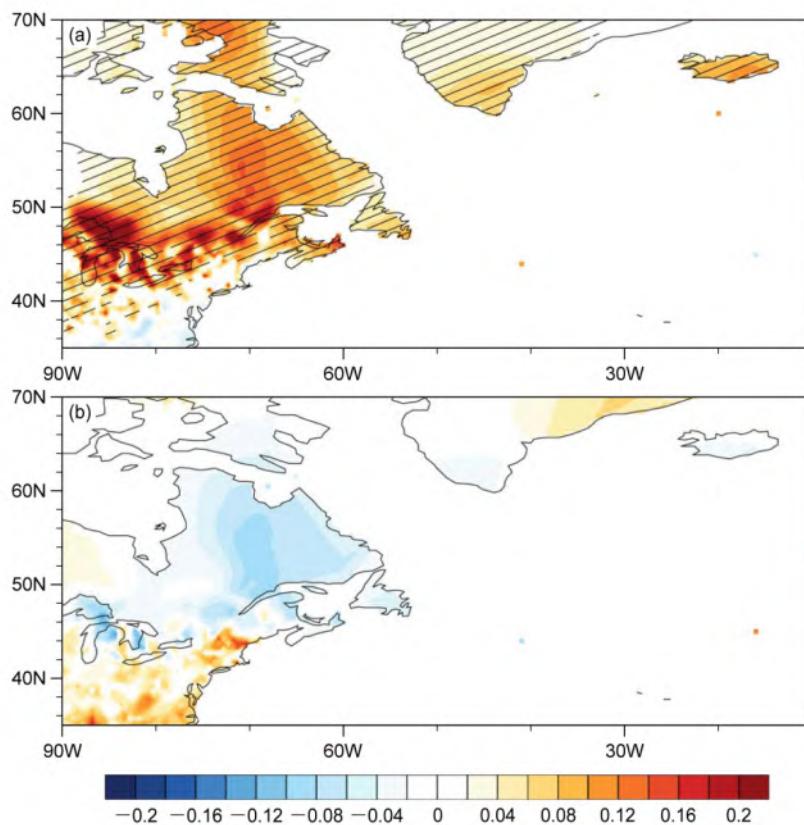


图 7 1901~2007 年年平均 AMO 指数和年平均陆地气温距平信息流的空间分布：(a) AMO 到年平均陆地气温距平的因果 (划线部分表示通过 0.05 显著性水平检验)；(b) 年平均陆地气温距平到 AMO 的因果

Fig. 7 The spatial patterns of (a) the information flow from the annual mean AMO index to anomalies of annual mean land surface air temperature for the period 1901–2007 area with black lines indicate 0.05 significance level based on z test and (b) the information flow from anomalies of land surface air temperature to the AMO index for the period 1901–2007

现在北美五大湖区域、格陵兰岛西南部和冰岛南部。这一结果与 AMO 和大西洋表面热通量之间的关系相对应, 这里因果分析的结果与此前 AMO 与大西洋周边陆地气温的超前滞后相关的分析结果也是对应的。我们也检查了四个季节的信息流分布, 结果与年平均的基本相似, 说明我们的结果并不依赖季节的选择。

AMO 通过热通量影响陆地气温, 因此我们还进一步检查了区域平均的热通量与陆地气温的因果关系。从图 8 中可以看出, 北大西洋海表热通量流向泛大西洋地区陆地气温的较强信息流的空间分布主要区域在北美的东北部, 冰岛和格陵兰岛南部也有较好的因果关系。说明北大西洋海表热通量是泛大西洋陆地气温多年代际变化的主要原因。

由此我们可以理解 AMO 影响泛大西洋地区陆地气温异常多年代际变化的物理过程, 即海洋通过控制海表热通量从而影响陆地气温。当 AMO 处于暖位相时, 海表热通量向外辐散, 即海洋释放更多的热量进入大气, 海洋加热大气, 从而陆地气温出现暖异常。而当 AMO 处于冷位相时, 热通量辐合, 海洋释放的热量减少, 对大气有冷却作用, 从而陆地气温变冷。热通量和气温的因果分析结果一致说明, 海洋主导了热量交换, 而非大气。因此, 大气随机热力强迫机制不能解释 AMO 和热通量及气温的因果关系, AMO 并非是大气随机强迫的产物。而 AMO 和热通量及气温的因果关系可以用海洋环流 AMOC 动力驱动机制来解释, 即 AMO 的冷

暖位相是由 AMOC 及其经向热输送所控制, 从而影响大西洋海气热量交换。因果分析的结果验证了海洋环流 AMOC 动力驱动的机制 (Gulev et al., 2013; Zhang et al., 2016)。

3.5 大西洋海温强迫试验模拟的泛大西洋地区陆地气温异常的响应

为了验证 AMO 指数与大西洋周边区域陆地气温多年代际变化之间因果关系的分析, 我们用模式模拟在仅改变北大西洋海表温度的情况下年平均表面温度距平数据与 AMO 指数做了回归系数的检验。

模式数据验证 AMO 与表面温度异常的回归结果与因果关系的结果大体相一致, 尤其是冰岛地区和格陵兰岛南部。图 9 给出了模式模拟在仅改变北大西洋海表温度的情况下 1901 至 2007 年平均表面温度距平与 AMO 的回归系数的空间分布。在 AMO 和陆地气温异常的因果分析结果较好的地区, 回归系数很明显, 尤其是在冰岛南部和格陵兰岛南部。北美东北部的回归系数则相对较小, 但结果依旧显著。很好地验证了 AMO 指数与表面温度异常的因果关系。

模式验证的结果表明在北大西洋沿岸地区所得出的结果与因果关系分析得出的结果在空间分布上相一致, 验证了 AMO 的变化会引起北大西洋沿岸地区平均陆地气温异常多年代际变化, 主要影响在泛大西洋地区, 北美五大湖地区、格陵兰岛南部和冰岛南部地区响应更强。

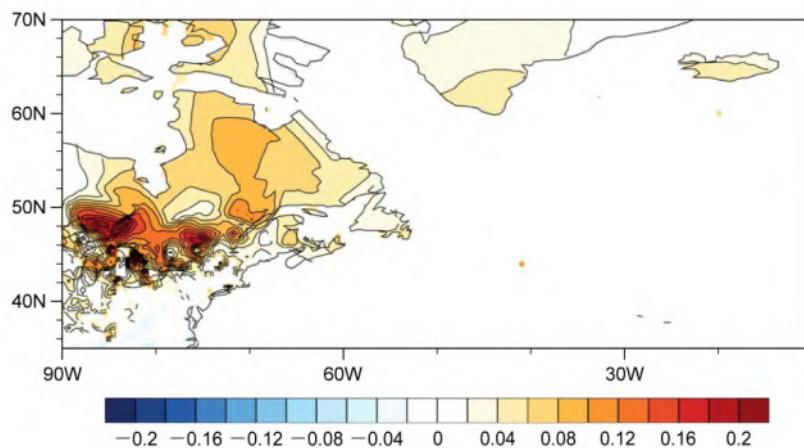


图 8 1901~2007 年大西洋年平均表面热通量距平到年平均陆地气温距平的信息流的空间分布

Fig. 8 Spatial pattern of the information flow from anomalies of annual mean surface heat flux to anomalies of annual mean land surface air temperature for the period 1901–2007

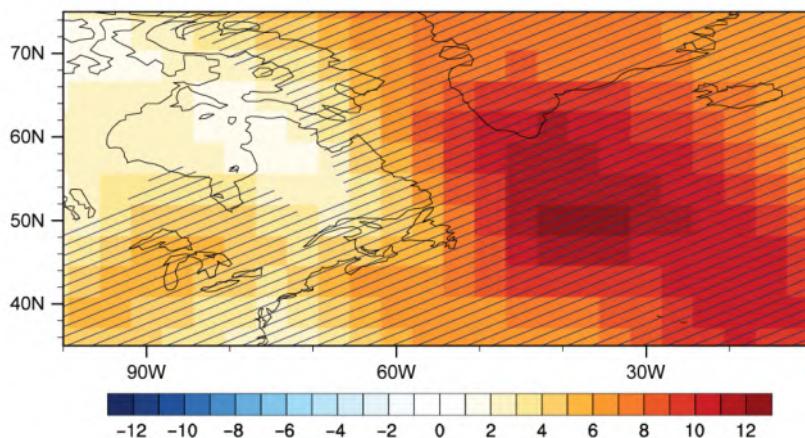


图9 模式模拟在仅改变北大西洋海表温度的情况下1901–2007年年平均表面温度距平与年平均AMO指数的回归系数（划线部分表示通过0.01显著性水平检验）

Fig. 9 Regression coefficient between annual mean AMO index and anomalies of annual mean land surface air temperature under the simulation of the model which changes SSTs of the North Atlantic only for the period 1901–2007 (area with black lines indicate 0.01 significance level based on Student *t* test)

4 结论与讨论

目前关于AMO的驱动机制仍存在争议。一种观点认为AMO是由海洋环流AMOC动力过程所驱动(Knight et al., 2005; 于雷等, 2010), 另外一种观点则认为是大气随机热力强迫驱动了AMO(Booth et al., 2012; Bellucci et al., 2017), 所以弄清AMO和北大西洋海表热通量的因果关系是辨析AMO动力和热力驱动机制的关键。传统相关分析的方法不足以确认AMO和北大西洋海表热通量的因果关系(Cane et al., 2017), 针对这个问题, 本文利用过去100多年来的大西洋海气观测资料, 采用基于信息流理论的因果分析方法研究了AMO与北大西洋表面热通量和沿岸陆地气温的因果关系, 主要结论如下:

(1) AMO与大西洋表面的海表热通量在年代际尺度上都呈现较好的相关关系。在此基础上, 因果分析表明AMO是大西洋海表热通量多年代际变化的原因, 海洋主导了海气间的热量交换, 而大气随机热力强迫机制不能解释观测到的海温和热通量间的因果关系。相反的, 海洋环流动力驱动机制可以较好地解释观测到的因果关系。

(2) AMO与泛大西洋地区的平均陆地气温异常的多年代际变化在空间和时间尺度上都有着较好的相关关系。从因果分析的结果来看, AMO是泛大西洋地区陆地气温异常多年代际变化的主导因

素, 影响地区主要在北美五大湖区域、格陵兰岛西南部和冰岛南部, 表明周边陆地气温的冷暖变化并非都是大气强迫的结果, AMO并非是大气随机热力强迫的产物。海洋环流AMOC动力驱动机制可以解释AMO影响泛大西洋地区陆地气温异常多年代际变化的物理过程, 即AMO的冷暖位相是由AMOC及其经向热输送所控制, 进一步影响大西洋海气热量交换, 从而对陆地气温产生影响。

(3) 大西洋海温强迫试验的结果也表明: 北大西洋沿岸地区所得出的结果与因果关系分析得出的结果大体相一致, 可以验证AMO的变化会引起北大西洋沿岸地区平均陆地气温异常多年代际变化。

综上所述, 本文因果分析的结果为辨析AMO的动力和热力驱动机制提供了新线索, 说明AMO并非是大气随机热力强迫的产物, 海洋主导了海气间的热量交换。尽管如此, 一些已有的研究工作表明北大西洋的大气环流模态(例如NAO)对海洋环流AMOC有强迫作用(Li et al., 2013; Sun et al., 2015; Delworth et al., 2017), 这种大气的动力强迫效应以及海洋对大气的热力影响可能是理解北大西洋年代际海气耦合的关键物理过程(Sun et al., 2015)。同时, 本文着重分析了年代际尺度上的AMO与大西洋表面热通量异常之间的因果关系, 由于现有的AMOC直接观测资料较少, 本文并没有针对AMOC与AMO之间进行因果关系的分析,

在今后的工作中需要借助模式资料进一步探讨。另外, 在年际尺度上大气作为噪音会对海洋产生强迫作用, 年际尺度上的因果是否有别于年代际尺度上的因果关系还有待进一步的研究。从图1中我们看到AMO与全球陆地气温有很好的相关关系, 目前我们的研究只关注了泛大西洋周边的陆地气温, 在今后的工作中与大西洋以外的地区还将进一步探讨, 我们还将进一步研究AMO与欧亚大陆极端气候事件(如热浪频次等)的因果关系(Zhou and Wu, 2016)。

参考文献 (References)

- Bellucci A, Mariotti A, Gualdi S. 2017. The role of forcings in the twentieth-century North Atlantic multidecadal variability: The 1940–75 North Atlantic cooling case study [J]. *J. Climate*, 30(18): 7317–7337. doi:10.1175/JCLI-D-16-0301.1
- Booth B B B, Dunstone N J, Halloran P R, et al. 2012. Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability [J]. *Nature*, 484(7393): 228–232. doi: 10.1038/nature10946
- Cane M A, Clement A C, Murphy L N, et al. 2017. Low-pass filtering, heat flux, and Atlantic Multidecadal Variability [J]. *J. Climate*, 30(18): 7529–7553. doi:10.1175/JCLI-D-16-0810.1
- Chylek P, Folland C K, Lesins G, et al. 2009. Arctic air temperature change amplification and the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36(14): L14801. doi:10.1029/2009GL038777
- Chylek P, Folland C, Frankcombe L, et al. 2012. Greenland ice core evidence for spatial and temporal variability of the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39(9): L09705. doi:10.1029/2012GL051241
- Clement A, Bellomo K, Murphy L N, et al. 2015. The Atlantic Multidecadal Oscillation without a role for ocean circulation [J]. *Science*, 350(6258): 320–324. doi:10.1126/science.aab3980
- Clement A, Cane M A, Murphy L N, et al. 2016. Response to comment on “The Atlantic Multidecadal Oscillation without a role for ocean circulation” [J]. *Science*, 352(6293): 1527. doi: 10.1126/science.aaf2575
- Delworth T L, Zeng F R, Zhang L P, et al. 2017. The central role of ocean dynamics in connecting the North Atlantic Oscillation to the extratropical component of the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *J. Climate*, 30(10): 3789–3805. doi:10.1175/JCLI-D-16-0358.1
- Drews A, Greatbatch R J. 2016. Atlantic multidecadal variability in a model with an improved North Atlantic current [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43(15): 8199–8206. doi:10.1002/2016GL069815
- Enfield D B, Mestas-Nuñez A M, Trimble P J. 2001. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U. S. [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28(10): 2077–2080. doi:10.1029/2000GL012745
- Gulev S K, Latif M, Keenlyside N, et al. 2013. North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales [J]. *Nature*, 499(7459): 464–467. doi:10.1038/nature12268
- Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — The CRU TS3.10 dataset [J]. *International Journal of Climatology*, 34(3): 623–642. doi: 10.1002/joc.3711
- Knight J R, Folland C K, Scaife A A. 2006. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(17): L17706. doi:10.1029/2006GL026242
- Knight J R, Allan R J, Folland C K, et al. 2005. A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32(20): L20708. doi: 10.1029/2005GL024233
- Kucharski F, Parvin A, Rodriguez-Fonseca B, et al. 2016. The teleconnection of the tropical Atlantic to Indo-Pacific sea surface temperatures on inter-annual to centennial time scales: A review of recent findings [J]. *Atmosphere*, 7(2): 29. doi:10.3390/atmos7020029
- Li J P, Sun C, Jin F F. 2013. NAO implicated as a predictor of Northern Hemisphere mean temperature multidecadal variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40(20): 5497–5502. doi:10.1002/2013GL057877
- Li S L, Bates G T. 2007. Influence of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the winter climate of East China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24(1): 126–135. doi:10.1007/s00376-007-0126-6
- 李双林, 王彦明, 鄂永祺. 2009. 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*, 32(3): 458–465. Li Shuanglin, Wang Yanming, Gao Yongqi. 2009. A review of the researches on the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and its climate influence [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(3): 458–465. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2009.03.014
- 李双林, 井元元, 罗菲菲. 2015. 工业革命前中国气温与大西洋年代际振荡(AMO)的可能联系 [J]. *中国科学: 地球科学*, 45(6): 864–878. Li Shuanglin, Jing Yuanyuan, Luo Feifei. 2015. The potential connection between China surface air temperature and the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) in the Pre-industrial Period [J]. *Science China Earth Sciences*, 58(10): 1814–1826. doi: 10.1007/s11430-015-5091-9
- Liang X S. 2014. Unraveling the cause-effect relation between time series [J]. *Phys. Rev. E*, 90(5-1): 052150(1-11). doi: 10.1103/PhysRevE.90.052150
- Liang X S. 2015. Normalizing the causality between time series [J]. *Phys. Rev. E*, 92(2): 022126. doi:10.1103/PhysRevE.92.022126
- Liang X S. 2016. Information flow and causality as rigorous notions ab initio [J]. *Phys. Rev. E*, 94(5): 052201-1-28. doi:10.1103/PhysRevE.94.052201
- Lu R Y, Dong B W, Ding H. 2006. Impact of the Atlantic multidecadal oscillation on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(24): L24701. doi:10.1029/2006GL027655
- 罗菲菲, 李双林. 2015. 动力统计相结合的未来30年东亚气温年代际预测 [J]. *中国科学: 地球科学*, 45(4): 402–413. Luo Feifei, Li Shuanglin. 2015. Joint statistical-dynamical approach to decadal prediction of East Asian surface air temperature [J]. *Science China*

- Earth Sciences, 57(12): 3062–3072. doi:10.1007/s11430-014-4984-3
- Luo F F, Li S L, Furevik T. 2011. The connection between the Atlantic Multidecadal Oscillation and the Indian summer monsoon in Bergen Climate Model Version 2.0 [J]. *J. Geophys. Res.*, 116(D19): D19117. doi:10.1029/2011JD015848
- McCabe G J, Palecki M A, Betancourt J L. 2004. Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 101(12): 4136–4141. doi:10.1073/pnas.0306738101
- Mohino E, Keenlyside N, Pohlmann H. 2016. Decadal prediction of Sahel rainfall: Where does the skill (or lack thereof) come from? [J]. *Climate Dyn.*, 47(11): 3593–3612. doi:10.1007/s00382-016-3416-9
- O'Reilly C H, Huber M, Woollings T. 2016. The signature of low-frequency oceanic forcing in the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43(6): 2810–2818. doi: 10.1002/2016GL067925
- O'Reilly C H, Woollings T, Zanna L. 2017. The dynamical influence of the Atlantic Multidecadal Oscillation on continental climate [J]. *J. Climate*, 30(18): 7213–7230. doi:10.1175/JCLI-D-16-0345.1
- Otterå O H, Bentsen M, Drange H, et al. 2010. External forcing as a metronome for Atlantic multidecadal variability [J]. *Nature Geoscience*, 3(10): 688–694. doi:10.1038/ngeo955
- 史锋, 杨保, 冯娟, 等. 2015. 利用树轮资料集成重建的过去2000年北半球年平均温度变化 [J]. 第四纪研究, 35(5): 1051–1063. Shi Feng, Yang Bao, Feng Juan, et al. 2015. Reconstruction of the Northern Hemisphere annual temperature change over the common era derived from tree rings [J]. *Quaternary Sciences (in Chinese)*, 35 (5): 1051–1063. doi:10.11928/j.issn.1001-7410.2015.05.01
- Stips A, Macias D, Coughlan C, et al. 2016. On the causal structure between CO₂ and global temperature [J]. *Sci. Rep.*, 6: 21691. doi:10.1038/srep21691
- Sun C, Li J P, Jin F F. 2015. A delayed oscillator model for the quasi-periodic multidecadal variability of the NAO [J]. *Climate Dyn.*, 45 (7–8): 2083–2099. doi:10.1007/s00382-014-2459-z
- Sun C, Li J P, Jin F F, et al. 2013. Sea surface temperature inter-hemispheric dipole and its relation to tropical precipitation [J]. *Environ. Res. Lett.*, 8(4): 044006. doi: 10.1088/1748-9326/8/4/044006
- Sun C, Li J P, Ding R Q, et al. 2017a. Cold season Africa–Asia multidecadal teleconnection pattern and its relation to the Atlantic multidecadal variability [J]. *Climate Dyn.*, 48(11–12): 3903–3918. doi:10.1007/s00382-016-3309-y
- Sun C, Kucharski F, Li J P, et al. 2017b. Western tropical Pacific multidecadal variability forced by the Atlantic multidecadal oscillation [J]. *Nature Communications*, 8: 15998. doi: 10.1038/ncomms15998
- Sutton R T, Hodson D L R. 2005. Atlantic ocean forcing of North American and European summer climate [J]. *Science*, 309(5731): 115–118. doi:10.1126/science.1109496
- Sutton R T, Dong B W. 2012. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s [J]. *Nature*, 5(11): 788–792. doi:10.1038/geo1595
- Ting M F, Kushnir Y, Seager R, et al. 2009. Forced and internal twentieth-century SST trends in the North Atlantic [J]. *J. Climate*, 22 (6): 1469–1481. doi:10.1175/2008JCLI2561.1
- 王彦明, 李双林, 罗德海, 等. 2010. 亚洲季风区气候对北大西洋年代际振荡冷暖位相的对称和非对称响应 [J]. *中国海洋大学学报*, 40 (6): 19–26. Wang Yanming, Li Shuanglin, Luo Dehai, et al. 2010. Nonlinearity in the Asian monsoonal climate response to Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Periodical of Ocean University of China (in Chinese)*, 40(6): 19–26. doi: 10.3969/j.issn.1672-5174. 2010.06.003
- Willmott C J, Robeson S M. 1995. Climatologically aided interpolation (CAI) of terrestrial air temperature [J]. *Int. J. Climatol.*, 15(2): 221–229. doi:10.1002/joc.3370150207
- 于雷, 鄂永祺, 王会军, 等. 2010. 北大西洋淡水扰动试验中东亚夏季风气候的响应及其机制 [J]. *科学通报*, 55(9): 798–807. Yu Lei, Gao Yongqi, Wang Huijun, et al. 2009. The responses of East Asian summer monsoon to the North Atlantic Meridional Overturning Circulation in an enhanced freshwater input simulation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(24): 4724–4732. doi:10.1007/s11434-009-0720-3
- Zhang R. 2017. On the persistence and coherence of subpolar sea surface temperature and salinity anomalies associated with the Atlantic multidecadal variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 44(15): 7865–7875. doi:10.1002/2017GL074342
- Zhang R, Delworth T L. 2006. Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(17): L17712. doi:10.1029/2006GL026267
- Zhang R, Delworth T L, Sutton R, et al. 2013. Have Aerosols Caused the Observed Atlantic Multidecadal variability? [J]. *J. Atmos. Sci.*, 70 (4): 1135–1144. doi:10.1175/JAS-D-12-0331.1
- Zhang R, Sutton R, Danabasoglu G, et al. 2016. Comment on “The Atlantic Multidecadal Oscillation without a role for ocean circulation” [J]. *Science*, 352(6293): 1527. doi: 10.1126/science.aaf1660
- Zhou Y F, Wu Z W. 2016. Possible impacts of mega-El Niño/Southern Oscillation and Atlantic Multidecadal Oscillation on Eurasian heatwave frequency variability [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142 (697): 1647–1661. doi:10.1002/qj.2759