大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

基于慢特征分析方法研究陆地表面气温变率的驱动力

朱丽飞 孙诚 李建平 张静 刘雨森 宫湛秋

Driving Force of Land Surface Air Temperature Variability Based on the Slow Feature Analysis Method

ZHU Lifei SUN Cheng LI Jianping ZHANG Jing LIU Yusen GONG Zhanqiu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2106.20213

朱丽飞, 孙诚, 李建平, 等. 2022. 基于慢特征分析方法研究陆地表面气温变率的驱动力 [J]. 大气科学, 46(3): 520−540. ZHU Lifei, SUN Cheng, LI Jianping, et al. 2022. Driving Force of Land Surface Air Temperature Variability Based on the Slow Feature Analysis Method [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(3): 520−540. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2106.20213

基于慢特征分析方法研究陆地表面气温变率的驱动力

朱丽飞[1] 孙诚[1] 李建平[2,3] 张静[1] 刘雨森[1] 宫湛秋[1]

1 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875
2 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室/海洋高等研究院/深海圈层与地球系统前沿科学中心, 青岛 266100
3 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室, 青岛 266237

摘 要 慢特征分析（SFA）方法可以从非平稳时间序列中提取出慢变的外强迫信息。近年来，SFA 方法被应用于气候变化研究领域，用于探究气候变化的潜在驱动力及相关的动力学机制。本文基于 SFA 方法，提取全球陆地表面气温（LSAT）的慢变外强迫信息，研究全球 LSAT 慢变驱动力的空间结构特征及低频变率的主要驱动因子。SFA 方法提取的 LSAT 慢变驱动力与历史时期全球辐射强迫（GRF）和全球海表温度（SST）的主模态（大西洋多年代际振荡 AMO、热带太平洋 ENSO 变率和太平洋年代际振荡 PDO）有显著的相关关系，表明全球大部分地区 LSAT 的变率受到 GRF 和三个 SST 模态的显著影响。GRF 对 LSAT 变率的影响有全球一致性的特征，而三个 SST 模态对 LSAT 变率的影响则呈现出明显的区域特点。此外，由于 SFA 方法可以有效降低原始 LSAT 序列中随机噪声的干扰，GRF 和 SST 模态对 LSAT 变率的解释方差显著提高，进一步表明 GRF 和 SST 模态是全球 LSAT 低频变率主要的驱动因子。最后，利用历史海温驱动 AGCM 试验（即 AMIP 试验）的结果，验证了三个 SST 模态对区域 LSAT 变率的显著影响。

关键词 慢特征分析（SFA） 陆地表面气温 驱动力 低频变率 AMIP 试验
文章编号 1006-9895(2022)03-0520-21 **中图分类号** P467 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2106.20213

Driving Force of Land Surface Air Temperature Variability Based on the Slow Feature Analysis Method

ZHU Lifei[1], SUN Cheng[1], LI Jianping[2,3], ZHANG Jing[1], LIU Yusen[1], and GONG Zhanqiu[1]

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 *Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System (FDOMES)/Key Laboratory of Physical Oceanography/Institute for Advanced Ocean Studies, Ocean University of China, Qingdao* 266100
3 *Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Pilot Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao* 266237

Abstract The slow feature analysis (SFA) can extract slowly varying external forcing information from non-stationary time series. In recent years, the SFA method has been applied to the climate change field to explore the potential driving forces of climate change and related dynamic mechanisms. This study extracts the slowly varying external forcing information of the global land surface air temperature (LSAT) based on the SFA method. It investigates the spatial

收稿日期 2020-10-16；**网络预出版日期** 2021-09-09
作者简介 朱丽飞，女，1997 年出生，硕士研究生，从事海—气相互作用研究。E-mail: 201921490019@mail.bnu.edu.cn
通讯作者 孙诚，E-mail: scheng@bnu.edu.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41975082
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41975082)

structure characteristics of the global LSAT slow varying driving force and the main driving factors of low-frequency variability. The LSAT slowly varying driving force extracted by the SFA method has a significant correlation with global radiative forcing (GRF) and the main modes of the global sea surface temperature (SST) (i.e., Atlantic Multidecadal Oscillation, tropical Pacific El Niño–Southern Oscillation variability, and Interdecadal Pacific Oscillation), indicating that the LSAT variability in most parts of the world is significantly affected by GRF and the three SST modes. The influence of GRF on the LSAT variability has global consistency, while that of the three SST modes on the LSAT variability has obvious regional characteristics. In addition, the interpretation variance of the LSAT variability of the GRF and SST modes significantly improved because the SFA method can effectively reduce the explanatory random noise in the original LSAT sequence, further showing that the GRF and SST modes are the main driving factors of the global LSAT low-frequency variability. Finally, the results of the historical sea surface temperature-driven Atmospheric General Circulation Model test, which is also known as the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP)test, verify the significant influence of the three SST modes on the regional LSAT variability.

Keywords　Slow Feature Analysis, Land surface air temperature, Driving force, Low frequency variability, AMIP test

1　引言

19 世纪末以来，全球平均表面温度（GMST, Global Mean Surface Temperature）呈现出百年尺度的增暖趋势，并且自 1970 年代以来增温趋势明显加快（IPCC, 2007）。全球表面温度普遍升高，但由于下垫面热力性质的不同存在差异。陆地区域的变暖速率一般要快于海洋。在 1880～2018 年期间，全球平均陆地表面气温（LSAT, Land Surface Air Temperature）增加了 1.41°C，而同期全球平均表面温度上升了 0.86°C（IPCC, 2013）。全球陆地的变暖也存在区域差异，20 世纪以来，相比于南半球，北半球的增温起始时间早，增温速度快，扩展范围广（Ji et al., 2014）。这种全球百年尺度的增温趋势与辐射强迫有关，主要原因是大气层中温室气体浓度的变化，尤其是人类活动导致的 CO_2 浓度增加所引起的温室效应的加剧（Wild, 2016）。

在 1951～2012 年期间，全球平均表面温度（GMST）每 10 年增长 0.12°C，但在 1998～2012 年期间，全球平均地面增温速率减缓，出现了气候变暖暂时的“停滞”（宋斌等, 2015; 林霄沛等, 2016; 苏京志等, 2016; 徐一丹等, 2019）。一些研究表明气候系统内部的自然变率对温度变化趋势有重要的调节作用（Wu et al., 2011; 徐一丹等, 2019）。在年际时间尺度上，热带太平洋的厄尔尼诺—南方涛动（ENSO, El Niño–Southern Oscillation）现象对全球平均温度有重要的影响（Lin and Qian, 2019）。在年代际时间尺度上，太平洋年代际振荡（IPO/PDO, Interdecadal Pacific Oscillation/Pacific Decadal Oscillation）表现出与 ENSO 空间结构相类似的特点（朱益民和杨修群, 2003; 杨修群等, 2004）。全球变暖减缓时期，海表温度（SST, Sea Surface Temperature）呈现异常的空间分布格局，主要表现为热带东太平洋海表温度持续冷却（Kosaka and Xie, 2013），这一现象与 ENSO 循环中拉尼娜冷事件以及 PDO 的冷位相有关（刘珊等, 2019）。除了太平洋，大西洋对全球平均温度的变化也有重要贡献（Sutton and Hodson, 2007）。通过年代际海气动力耦合的作用，北大西洋涛动（NAO, North Atlantic Oscillation）超前北大西洋海温多年代际振荡（AMO, Atlantic Multidecadal Oscillation）和北半球平均温度（NHT, North Hemisphere Temperature）15～20 年，20 世纪 90 年代开始的 NAO 年代际减弱对后期的全球变暖减缓有重要贡献（龚道溢等, 2001; Sun et al., 2015; 苏京志等, 2016）。这种年代际尺度的超前关系可以用大气强迫对海洋环流的累积效应来解释。此外，有学者利用旋转经验正交函数（REOF, Rotated Empirical Orthogonal Function）的方法研究 GMST 的变率，发现大西洋通过 AMO 对 GMST 的年代际变率贡献最大，而太平洋地区主要通过 ENSO/PDO 及其遥相关，太平洋海温变率对 GMST 的贡献相比大西洋要小的多，并且发现 AMO/PDO/ENSO 三个海温模态加上长期趋势后可以很好地拟合全球平均海温 (Global Sea Surface Temperature)（Chen and Tung, 2018），并被视为重要的海洋变率。尽管辐射强迫和气候系统内部变率对全球气温的变化有显著影响，但在区域尺度上不同因子的作用差异还有待进一步阐明。

气候模式模拟的结果表明全球和区域尺度温度的变化是外部辐射强迫和气候内部变率相互作用的

产物（Meehl et al., 2013; Yu et al., 2020; Xiao et al., 2020）。气候系统是一个复杂的非线性系统，其背后的物理机制有时很难解释。气候系统变化的驱动力和因果关系分析是气候动力学的一个基本问题。不同领域的研究者已经提出了一些新的方法来研究动力系统的驱动力，这些方法能够将隐含在观测或模拟的非平稳时间序列中的驱动力提取出来。具有代表性的方法主要有：Granger 因果关系、条件互信息和转移熵、收敛交叉映射（CCM, Comvergent Cross Mapping）（Granger, 1969; Schreiber, 1997; Sugihara et al., 2012; Tsonis et al., 2015）以及慢特征分析（SFA, Slow Feature Analysis）（潘昕浓等, 2016, 2017）。SFA 可以从快速变化的动力系统中提取缓慢变化的驱动力，能够有效地估计系统内在的驱动力（Wiskott, 2003; Konen and Koch, 2011）。其优势是不需要了解所研究系统的具体的数学模型，利用长期的观测数据，可以直接提取观测数据背后的驱动力，并且该方法可以有效地克服随机噪音的干扰。该方法最初是在神经生物学领域发展起来的，后来推广到物理、工程学和气候变化等其他领域。已有研究利用 SFA 方法和小波分析，重建了北半球月平均地表气温异常时间序列的驱动力，发现该驱动力包括两个独立的自由度，分别与 22 年太阳活动周期和 AMO 气候变率有关（Yang et al., 2016）。随后，有学者提出了一种在平稳区域对非平稳系统产生影响的情况下重构驱动力的新方法（Zhang et al., 2017），且数值分析表明，原始和重构驱动力之间的相关系数可以达到 0.97，后利用该方法应用在北半球月平均地表气温时间序列中，结果同样证明其基本强迫周期与太阳黑子和 AMO 的周期一致。也有学者基于最长仪器观测的英格兰中部温度 CET 数据集，同样结合 SFA 方法和小波分析，得出气候变化的驱动力有 3.36 和 22.6 两个自由度，它们分别与 ENSO 生命周期和太阳黑子循环周期有关（Wang et al., 2017）。另有研究在中欧 LSAT 的站点观测数据基础上提取驱动力，发现其与 NAO 有显著正相关关系（Wang et al., 2019）。

已有研究结果表明 SFA 方法在提取非平稳系统的慢变驱动力以及研究长期气候变化的驱动因子等方面有非常明显的优势。以往利用 SFA 提取非平稳系统慢变驱动力的研究多是针对某个区域平均的时间序列（Schreiber, 2000; Yang et al., 2016; Zhang et al., 2017; 范开宇等, 2018; Tsonis et al., 2019; Zhang et al., 2019）。一维时间序列的分析方法在分析包含时—空协同演变信息的多维数据方面有局限性（胡淑娟, 2006; 刘海涛等, 2007; 胡淑娟等, 2020）。由于不同地区气候的慢变驱动力在时间演变上并不一致，在全球范围内，不同地区气候慢变驱动力之间的关系以及全球气候慢变驱动力的空间结构差异，这些问题还尚未得到较好的解释，所以有必要对不同空间尺度上的慢变驱动力进行诊断。以 LSAT 为例，从多维时空角度在全球范围内提取 LSAT 的慢变驱动力，为理解全球气温慢变驱动力的空间特征提供了思路。基于此，将 SFA 方法拓展到时空三维的 LSAT 场中，包括时间、经度、纬度三个维度，在全球范围内提取 LSAT 的慢变信号。具体来说，就是将格点资料中每个格点的 LSAT 时间序列首先进行独立的 SFA 分析，而后再从全球范围对 LSAT 慢变驱动力的空间特征进行整体分析。

本文将过去 100 多年来观测记录的原始气温场提取的慢变驱动力信号分别与全球辐射强迫（GRF, Global Radiation Forcing）、AMO、PDO 和 Niño3.4 气候指数进行相关分析，与原始观测结果做对比，并选择显著区域平均 LSAT 的驱动力进行分析。通过分析 GRF 和不同气候指数对全球观测 LSAT 异常以及气候系统慢变驱动力的影响，证明气候外部强迫与内部变率（主要是海洋内部变率）对 LSAT 的重要影响。最后为了验证结果的可靠性，使用模式模拟结果来验证 GRF 与三大气候指数对 LSAT 的重要影响。

文章第二部分介绍数据来源与研究方法；第三部分介绍 LSAT 观测数据与 SFA 方法提取的慢变驱动力分别与 GRF、AMO、PDO、Niño3.4 气候指数做相关分析的结果；第四部分介绍模式验证得到的结果。第五部分介绍了本研究得到的主要结论和引发的讨论。

2 数据与方法

2.1 数据来源与介绍

全球逐月陆地表面气温数据来自物理科学实验室（PSL, Physical Sciences Laboratory）特拉华大学气温与降水数据集（University of Delaware Air Temperature & Precipitation）V3.01 版本 https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.UDel_AirT_Precip.html [2020-05-22]。该数据为格点数据，包括 1900～

2010 年全球气温和降水高分辨率站点（陆地）月数据。哥特华大学的 Cort Willmott 和 Kenji Matsuura 收集了大量来自 GHCN2（全球历史气候网络）和公共档案的数据。数据集覆盖全球包括南极洲在内的陆地，补充了国际海洋大气综合数据集（ICOADS）。文中使用该数据集中的逐月陆地表面气温数据，且与影响因子做相关分析时未做任何滤波或者平滑处理。

AMO、PDO、Niño3.4 逐月海温指数来源于世界气象组织下属的气象数据检索平台 Climate Explorer（ http://climexp.knmi.nl/selectindex.cgi?id=someone@somewhere [2020-05-22]）。

AMO 是北大西洋 SST 模态的主要信号，在 50～70 年波段具有显著的波谱峰值。有关研究表明，AMO 是影响区域至半球尺度气候的气候系统内部变率。本研究中 AMO 被定义为北大西洋地区赤道以北至极地（0°～60°N，0°～80°W）的海温减去 60°S～60°N 区域海面平均温度，数据来源于 NCDC 的 ERSST V5 数据集。

ENSO（El Niño、La Niña 和南方涛动）被认为是热带太平洋上一种自然的海洋—大气耦合模态（Deser et al., 2010），对全球的气候有重要的影响（Newman et al., 2003）。本研究中采用 Niño3.4 指数表示 ENSO 事件，定义为 HadSST1 数据集分析得到的 Niño3.4 区域（5°N～5°S，170°W～120°W）范围内的平均海表温度异常，正值代表 El Niño，负值代表 La Niña。

太平洋年代际涛动（Pacific Decadal Oscillation, PDO）是北太平洋区域海温的主导模态，其相位的变化可以影响北太平洋甚至是北半球大气环流的变化。PDO 处于正位相时，北太平洋海水变冷，负位相则反之。本文中 PDO 指的是北太平洋地区 20°以北逐月海表温度异常正交函数分解第一模态（EOF1）的时间序列（Mantua et al., 1997; Kosaka and Xie, 2013）。Messié and Chavez（2011）对全球 SST 异常进行 EOF 分解，发现全球 SST 年际到年代际尺度的变率主要由 ENSO、AMO 和 PDO 三个海温模态所主导（解释方差合计接近 30%）。因此，本文分析的 AMO、ENSO 和 PDO 三个海温模态在时间和空间是相对独立的。

全球辐射强迫数据来自于 CMIP5 GISS-E2 Global Radiative Forcing (Fi) Data （Miller et al., 2014；https://data.giss.nasa.gov/modelforce/[2020-05-22]）。其是以年为单位的连续辐射强迫。辐射强迫包括太阳辐射、温室气体、火山活动、臭氧、气溶胶、土地利用变化等辐射传输总和，也叫全球总辐射强迫，用 GRF 表示，在这里代表气候系统的大部分外部因素。

2.2　方法

SFA 方法能够提取非线性平稳系统的慢变驱动力信号。其是将实际观测数据嵌入到 m 维的空间里，进行一系列的变换与重组，利用最小二乘法求出数学模型的常数，进而提取慢特征变量，得到系统的驱动力。对于未知动力系统的给定时间序列 $\{x(t)\}_{t_1,\cdots,t_n}$，这里 t 表示时间，n 表示时间序列的长度，SFA 算法的基本步骤如下：

（1）将 $\{x(t)\}$ 嵌入到一个 m 维状态空间中，进行空间重构，

$$X(t)=\{x_1(t),x_2(t),\cdots,x_m(t)\}_{t_1,t_2,\cdots,t_N}, \tag{1}$$

这里空间重构后的时间序列的长度 $N=n-m+1$。

（2）利用式公式（1）生成的所有 1、2 阶单项式，共 k 个单项式，构造一个 k 维函数空间，如下：

$$\begin{aligned}H(t)=&\{x_1(t),\cdots,x_m(t),x_1^2(t),\cdots,x_1(t)x_m(t),\cdots,\\&x_{m-1}^2(t),x_{m-1}(t)x_m(t),x_m^2(t)\}_{t=t_1,t_2,\cdots,t_N},\end{aligned} \tag{2}$$

方便起见，上式可写成：

$$H(t)=\{h_1(t),h_2(t),\cdots,h_k(t)\}_{t=t_1,t_2,\cdots,t_N}, \tag{3}$$

式中 $k=m+m(m+1)/2$。

（3）将公式（3）统一到一个球面上，生成零均值、单位协方差的坐标分量，即

$$H'(t)=\{h_1'(t),h_2'(t),\ldots,h_k'(t)\}_{t=t_1,t_2,\ldots,t_N}, \tag{4}$$

这里 $\overline{h_j'}=0$，$h_j'h_j'\mathrm{T}=1$，$h_j'(t)=\left(h_j(t)-\overline{h_j'}\right)/S$，并且 $S=\frac{1}{k}\sqrt{\sum_{j=1}^{k}(h_j-\overline{h})^2}$。

（4）利用 Schmidt 算法（省略），将公式（4）正交化为

$$Z(t)=\{z_1(t),z_2(t),\cdots,z_k(t)\}_{t=t_1,t_2,\cdots,t_N}. \tag{5}$$

到目前为止，每个输出信号都可以表示为以下线性组合：

$$y(t)=a_1z_1(t)+a_2z_2(t)+\cdots+a_kz_k(t), \tag{6}$$

这里 $(a_1,a_2,\cdots,a_k)$ 是一组加权系数。因为 $\dot{z}_i(t)\cdot\dot{z}_j(t)=0$，$\bar{z}_i(t)=\bar{z}_j(t)=0$, $z_j(t)z_j^{\mathrm{T}}(t)=1$，所以输出信号是正交的。

（5）对公式（5）进行一阶差分，即，$\dot{z}_j(t_i)=z_j(t_{i+1})-z_j(t_i)$，得到导函数空间：

$$\dot{Z}(t)=\{\dot{z}_1(t),\dot{z}_2(t),\cdots,\dot{z}_k(t)\}_{t=t_1,t_2,\cdots,t_N}. \quad (7)$$

（6）建立矩阵$B=\left(\dot{Z}\dot{Z}^{\mathrm{T}}\right)_{k\times k}$，计算特征值$\lambda_1\leqslant\lambda_2\leqslant\cdots\leqslant\lambda_k$和相应的特征向量。使用$W_1$来代表与特征值$\lambda_1$相对应的特征向量，那么就得到了最慢的驱动力信号，可以表示为

$$y_1=rW_1Zt+c, \quad (8)$$

式中的 r 和 c 是两个随机常数，可由公式（6）和W_1的正交解得到。当选择最小的特征值λ_1时，代入最小的特征向量，积分后得到最慢的信号分量，即所研究系统的慢变驱动力。

以上是提取驱动力步骤的简单介绍，具体可以在 Yang（2016）和范开宇等（2018）的文章中找到。值得注意的是：如果一个驱动力包括多个成分,系统本身的可预测性和嵌入维数 m 的大小可能会改变提取结果（Konen and Koch, 2009, 2011）。

数据处理过程：对逐个格点上的 LSAT 原始序列去除年循环，然后设置嵌入维度数 m 为 13（对应的驱动力分辨率为一年）（Yang et al., 2016; 潘昕浓等, 2016），时滞参数 τ 为 1，利用 SFA 方法，将资料中每个格点的 LSAT 时间序列首先进行独立的 SFA 分析，提取其慢变驱动力；而后从全球范围对 LSAT 慢变驱动力的空间特征进行整体分析。此外，SFA 提取的外强迫和实际外强迫相差一个放大因子和平移系数（Wang et al., 2011），因此本文重点探讨 SFA 提取的外强迫和实际外强迫之间相关性的强弱。

2.3 模式模拟

历史海温驱动的 AGCM 试验，即 AMIP（Atmospheric Model Intercomparison Project），其根据海表温度和海冰数据反演出真实的大气辐射强迫，是一个专门为大气环流模式所设计的试验计划（冯娟和李建平, 2012; 安然等, 2019），同时也是全球大气环流模式的标准输出实验协议。它为从事全球气候模式的诊断分析、验证、比较和数据交流提供了一个基本平台。AMIP 模型配置能够使研究更加专注于大气模型，而不会增加气候系统中海洋—大气反馈的复杂性，可以说是一个“理想的海洋”。该模式综合了 10 个集合的平均结果，可以大大减少大气内部过程对 LSAT 的影响，从而保留了辐射和海温等外强迫对 LSAT 的影响。模拟试验过程中的外部辐射强迫部分，采用观测（记录）到的太阳活动和大气成分变化（包括温室气体、气溶胶和火山气溶胶）来驱动所有的历史强迫实验（Xu et al., 2020）。CAM5（Community Atmosphere Model 5）是 CESM 的大气模式，依托美国国家海洋大气局（NOAA）地球系统研究实验室（ESRL）平台，用 AMIP 观测辐射通量做强迫来模拟全球表面温度。所以，模式的结果很大程度上能够反映 LSAT 的慢变驱动力。

本文使用该模式输出的百年尺度 LSAT 与 GRF、AMO、Niño3.4 和 PDO 指数进行相关分析。在没有海洋—大气反馈的作用下，分析 LSAT 发展变化的内部驱动机制，得出 LSAT 不仅受外辐射强迫，还受年际以及年代际 SST 自然变率的影响。模式结果再现了 LSAT 的观测结果，验证了其受到 GRF、AMO、Niño3.4、PDO 的区域影响。

3 结果与分析

本文利用 SFA 方法探讨了 LSAT 的慢变信息，我们所使用的是 1900～2010 陆地气温的观测资料，时间分辨率为逐月。因此，利用 SFA 方法提取的 LSAT 慢变信号在时间尺度上主要包含了年际和年代际尺度等低频信号。结果发现，较原始观测数据，使用 SFA 方法提取的全球 LSAT 的慢变驱动力时间序列，与 GRF、AMO、Niño3.4 和 PDO 指数的相关性有了很大的提高，这进一步证明 LSAT 不仅受到外部强迫作用，还受到海洋作用的显著影响。

3.1 全球辐射强迫对 LSAT 的影响

地球从自身以外获取能量的主要途径是太阳辐射，可以说太阳辐射是地球表面热量的主要能量来源。自工业革命以来，全球温室气体浓度不断增加，全球地表温度也随之上升。目前已有大量关于温室气体浓度增加导致全球增温及其内部物理机制的研究（Kang et al., 2010）。本文重点是从全球辐射强迫和海洋作用的角度来分析地表增温的时空特征。总辐射强迫空间分布图显示，在全球大部分地区是增加的趋势，只有在东南亚地区和北美中部地区是下降趋势（Miller et al., 2014）（图略）。

需要说明的是，SFA 方法由于受到嵌入维度 m 和时滞参数 τ 的制约，提取出的慢变驱动力的始末年份可能失真，故在提取结果中删除了始末年份，保留 1901～2009 年的驱动力结果。为使结果具有可比性，统一选取 1901～2009 年时间段的观测

LSAT、GRF 和三大 SST 模态进行分析。

图 1a 表明，GRF 对全球大部分地区观测 LSAT 存在普遍影响，例如非洲、南美洲北部和东部、欧亚大陆东南部、南极洲大部分地区、格陵兰岛东部和澳洲中部地区。在这些地区，区域平均 LSAT 与 GRF 的相关系数都在 0.5 以上。不同的是，南极洲东半球部分区域 LSAT 受到 GRF 的异常影响。图 1b 显示，与观测结果相比，SFA 方法提取的慢变驱动力与 GRF 的相关系数明显增大，特别是欧亚大陆中部、非洲中部和南极洲地区。GRF 可能在很大程度上影响甚至决定 LSAT，甚至说 GRF 是 LSAT 的重要慢变驱动力之一。为了进一步探究 LSAT 和 GRF 的关系，文中选择两个显著相关地区，即欧洲中部地区（30°～60°N，30°～60°E）和北非地区（0°～30°N，0°～30°E）的区域平均 LSAT 和 GRF 进行具体分析。由于文中使用的 GRF 数据是以年为单位，相应地对 1901～2009 年 LSAT 和驱动力时间序列求年平均，将其转化成以年为单位的数据，再进行相关分析。

欧亚和非洲作为世界上最大的两个大陆，其在一定程度上可以代表大陆 LSAT 的发展趋势。图 2 显示，中欧和北美大陆 LSAT 与 GRF 显著相关，1901～2009 年期间，GRF 呈现增加的趋势，特别是自工业革命时代二十世纪七十年代以来，全球辐射强迫增加迅速，同样 LSAT 也呈现快速上升的趋势，这与全球变暖的大背景一致。表 1 显示，二者的相关性十分显著，欧洲中部地区观测 LSAT 与 GRF 的相关系数为 0.58，SFA 提取的慢变驱动力信号为 0.71，解释方差增长 17%；北非地区观测 LSAT 和 SFA 提取的慢变驱动力与 GRF 的相关系数分别是 0.64 和 0.70，而解释方差相差 8%。以上结果表明，SFA 提取的慢变驱动力与 GRF 的相关性明显增强。而且，在 1901～2009 年期间，GRF 出现四次显著下降（红色实线向下尖端），在每次总辐射突然下降后不久，LSAT 也出现下降的现象。这也进一步说明 GRF 对 LSAT 有显著影响。

3.2　AMO 对 LSAT 的影响

相关研究表明，AMO 作为气候系统的内部变率之一，对区域和半球尺度的气候都有影响（Knight et al., 2006; Zhang et al., 2007; 杨韵等, 2018），特别是北半球平均 LSAT 和北极海冰异常的多年代际变化。有学者研究证明，北大西洋海温对北半球 SAT 有重要调控作用。观测和数值模拟试验表明，在年代际尺度上，AMO 可以影响北半球大部分地区 LSAT，其年时间序列的波峰与去趋势后的北半球地表温度的波峰变化在很大程度上是同步的（Li et al., 2013）。有研究利用经验正交函数分析（EOF , Empirical Orthogonal Function）得出 LSAT 的 EOF4 与 AMO 有显著相关性，EOF4 能够解释 LSAT 的年代际变化，特征区域主要集中在北半球（Dai et al., 2015）。AMO 作为接近最大时间尺度的气候内部自然变率，对全球地表温度有

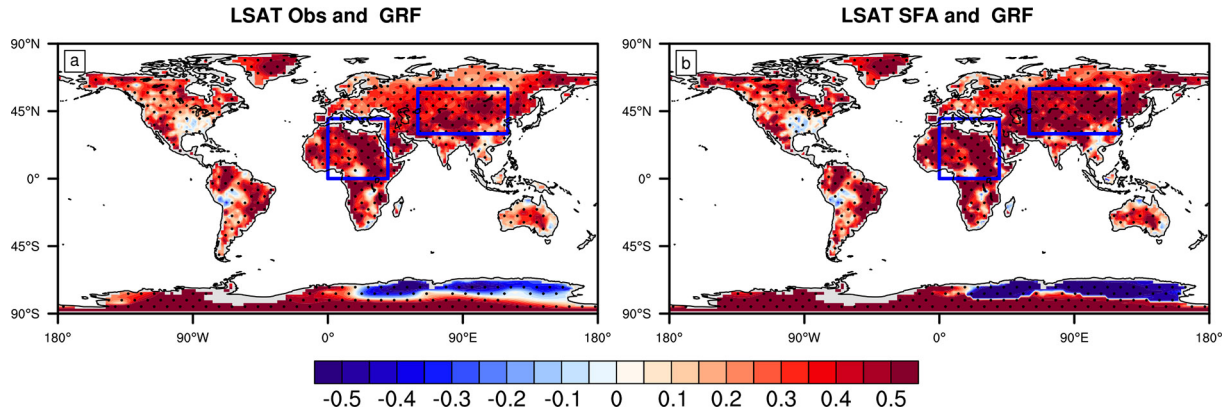

图 1　1901～2009 年（a）观测 LSAT、（b）SFA 方法提取的 LSAT 慢变驱动力与逐年 GRF 的相关系数的空间分布。蓝色方框内为相关系数显著增加的区域，分别为北非地区（0°～30°N，0°～30°E）、欧亚大陆中部地区（30°～60°N，30°～60°E）。黑色打点区域代表通过 95% 的信度水平检验

Fig. 1　Correlation of (a) the original observed LSAT(Land Surface Air Temperature) and (b) the LSAT slow driving force extracted by the SFA(Slow Feature Analysis) method with the annual GRF(Global Radiation Forcing) for 1901–2009. In the blue boxes, the regions with significantly increased correlation coefficients are Central Eurasia (30°–60°N, 30°–60°E) and North Africa (0°–30°N, 0°–30°E). Regions above 95% confidence level are black spotted

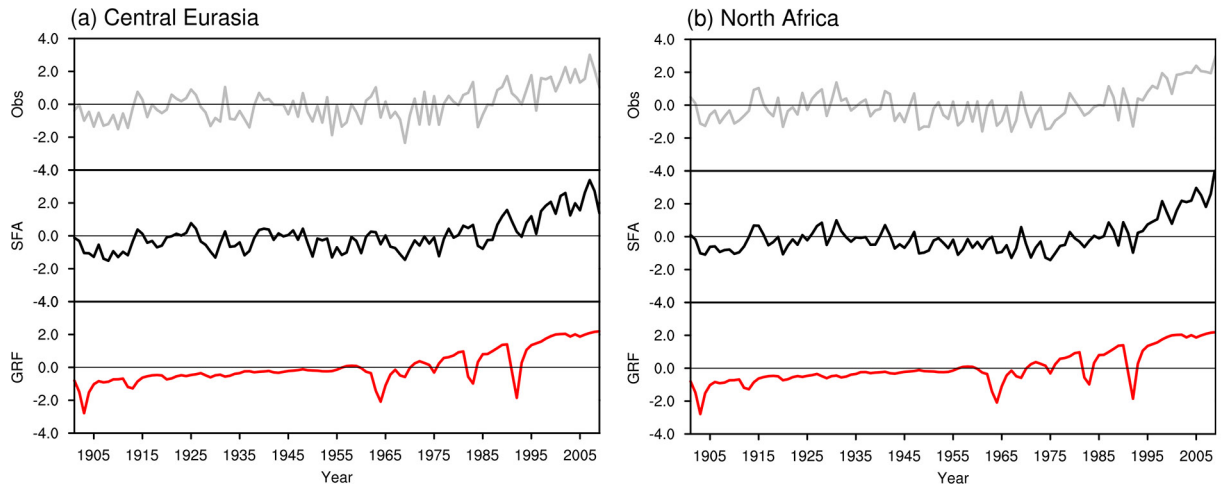

图 2 1901～2009 年（a）欧亚大陆中部地区（30°～60°N，30°～60°E）、（b）北非地区（0°～30°N，0°～30°E）区域年平均 LSAT 与逐年 GRF 的标准化时间序列。红线表示 GRF，灰线表示观测 LSAT，黑线表示 SFA 方法提取的 LSAT 慢变驱动力

Fig. 2 Normalized time series of the regional mean annual LSAT in (a) Central Eurasia (30°–60°N, 30°–60°E) and (b) North Africa (0°–30°N, 0°–30°E) and annual GRF for 1901–2009. The red lines represent the annual GRF. The gray line represents the original observed LSAT. The black line represents the LSAT slow driving force extracted by the SFA method

表 1 区域平均的 LSAT 与逐年 GRF 的相关系数和解释方差

Table 1 Correlation coefficient and explanatory variance of the regional mean LSAT and the annual GRF

区域	相关系数		增长量(绝对值)	解释方差		增长量
	原始序列	SFA方法提取的慢变驱动力		原始序列	SFA方法提取的慢变驱动力	
欧洲中部	0.58	0.71	0.13	34%	50%	16%
北非地区	0.64	0.70	0.06	41%	49%	8%

显著的影响。将全球 LSAT 的观测数据和驱动力时间序列分别与 AMO 指数做相关，以此来进一步分析 AMO 对全球 LSAT 的影响。

如图 3a 所示，AMO 与北半球大部分陆地表面气温显著相关，如大西洋周边和东亚地区。图 3b 中 SFA 提取的慢变驱动力与 AMO 有更强的相关性，在低纬度地区和北半球中高纬度地区表现十分明显，尤其是北大西洋周边地区（格陵兰岛、北美洲东南部）、东亚、南美洲和非洲部分地区。

AMO 通过“大气桥”和“海气耦合桥”影响下游欧亚大陆气候（Li and Bates, 2007; Wang et al., 2009; 李双林等, 2009, 2015; 罗菲菲和李双林, 2015）。有研究表明 AMO 和东亚地区（具体区域范围：20°～40°N，90°～120°E）LSAT 在同期达到最大相关，年均值相关系数达到 0.6 以上，且证明 AMO 可能通过西向波列影响东亚表面温度（Xie et al., 2019）。

AMO 还可能通过海洋—大气之间的耦合作用影响周边地区 LSAT。有研究表明，北美大陆的冬季增温与 AMO 正位相期间出现的两个低压异常中心有关，欧洲大陆夏季温度正异常可能与北大西洋暖海温有关（Sutton and Hodson, 2005, 2007）。此外，还有研究表明 AMO 对大西洋周边地区（北美洲东北部、格陵兰岛、冰岛）的热通量和 LSAT 有显著相关关系，并且利用信息流理论的因果方法证明 AMO 是后两者的因（Gong et al., 2020）。

月尺度分辨率的 AMO 与对应时间分辨率的观测 LSAT 之间的相关系数并不大，最大相关系数不超过 0.3，而利用 SFA 方法提取的 LSAT 慢变驱动力信号与 AMO 的相关系数可以达到 0.44。这也进一步说明 AMO 对 LSAT 有着重要的影响。本文列出三个显著相关区域，分别是东亚地区（17°～37°N，90°～110°E）、北美洲东部（43°～63°N，49°～69°W）、和格陵兰岛地区（58°～78°N，37°～57°W）LSAT 与 AMO 的时间序列，以进一步探究 AMO 对局地 LSAT 的影响。

图 4 显示，在年代际尺度上，AMO 指数在 1901～2009 年期间存在一个“负—正—负—正”

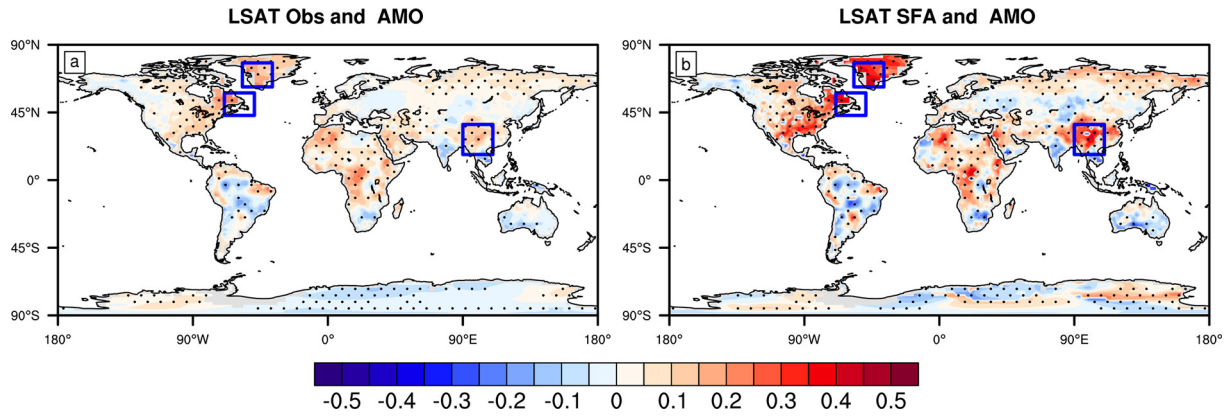

图 3　同图 1，但为 1901～2009 年（a）观测 LSAT、（b）SFA 方法提取的 LSAT 慢变驱动力与逐月 AMO 指数的相关系数的空间分布。蓝色方框区域分别为东亚地区（17°～37°N，90°～110°E）、北美洲东部（43°～63°N，49°～69°W）和格陵兰岛地区（58°～78°N，37°～57°W）

Fig. 3　As in Fig. 1, but for correlation of (a) the original observed LSAT and (b) the LSAT slow driving force extracted by the SFA method with the monthly AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) index. The blue boxes represent East Asia (17°–37°N, 90°–110°E), eastern North America (43°–63°N, 49°–69°W), and Greenland (58°–78°N, 37°–57°W)

的位相变化，而三个地区的 LSAT 也出现了这样的变化特征。在 1925～1945 年，AMO 处于正位相，而 LSAT 高于平均温度，出现变暖。并且，在 1901～1920 年和 1990～2009 年 LSAT 和 AMO 的峰谷变化基本一致，但是在观测 LSAT 时间序列中，由于许多天气噪音干扰，这种变化特征并不明显。特别是从长达百年的时间维度上可以看出，SFA 提取的 LSAT 慢变信号和 AMO 在多年代际尺度上存在着十分密切的联系。并且，相比于观测数据，SFA 提取的慢变驱动力信号与 AMO 的相关系数显著增大，解释方差也有明显增加。

东亚地区与大西洋地区虽未毗邻，但是它们之间却存在着重要联系。表 2 显示，东亚地区平均 LSAT 观测时间序列与 AMO 的相关系数只有 0.13，但是 SFA 提取的慢变驱动信号与 AMO 指数的相关系数可以达到 0.33，解释方差也增加了 9%，并且在多年代际尺度上总体变化趋势和峰谷的位置基本一致。可见，SFA 方法能够有效地去除数据中的天气噪音信号，能够真实体现陆地温度的驱动力信号。

图 3 表明 AMO 对北美洲东部和格陵兰岛这些大西洋周边地区有很大的影响。曾有研究通过气候模式模拟得出，大西洋通过重新分配内部海洋的热量可以产生类似于观测的多年代际变率，而 AMO 作为内部海洋变率，可以作为北半球温度多年代际变率的可靠解释（Sutton and Hodson, 2007）。AMO 通过影响海洋以及沿海陆地的热通量，进而影响北大西洋沿岸地区 LSAT 变化。表 2 显示，北美洲东部、格陵兰岛地区平均 LSAT 时间序列与 AMO 的相关系数分别为 0.25 和 0.18，而 SFA 提取出的驱动力与 AMO的相关系数则分别达到 0.44 和 0.39，解释方差分别增加 13% 和 12%。这进一步证明 AMO 可能是大西洋周边地区 LSAT 多年代际变率的驱动力之一。

AMO 对北半球 LSAT 有显著的影响，主要集中在大西洋周边（北美洲东北部、格陵兰岛）、亚洲东南地区和非洲部分地区。在选择的三个地区中，SFA 提取的 LSAT 慢变驱动力与 AMO 的相关性显著提高，解释方差明显增长，进一步证明 AMO 对 LSAT 有显著影响。

表 2　同表 1，但为逐月 AMO 指数

Table 2　As in Table 1, but for the monthly AMO index

区域	相关系数			解释方差		
	原始序列	SFA方法提取的慢变驱动力	增长量(绝对值)	原始序列	SFA方法提取的慢变驱动力	增长量
东亚地区	0.13	0.33	0.20	2%	11%	9%
北美洲东部	0.25	0.44	0.19	6%	19%	13%
格陵兰岛	0.18	0.39	0.21	3%	15%	12%

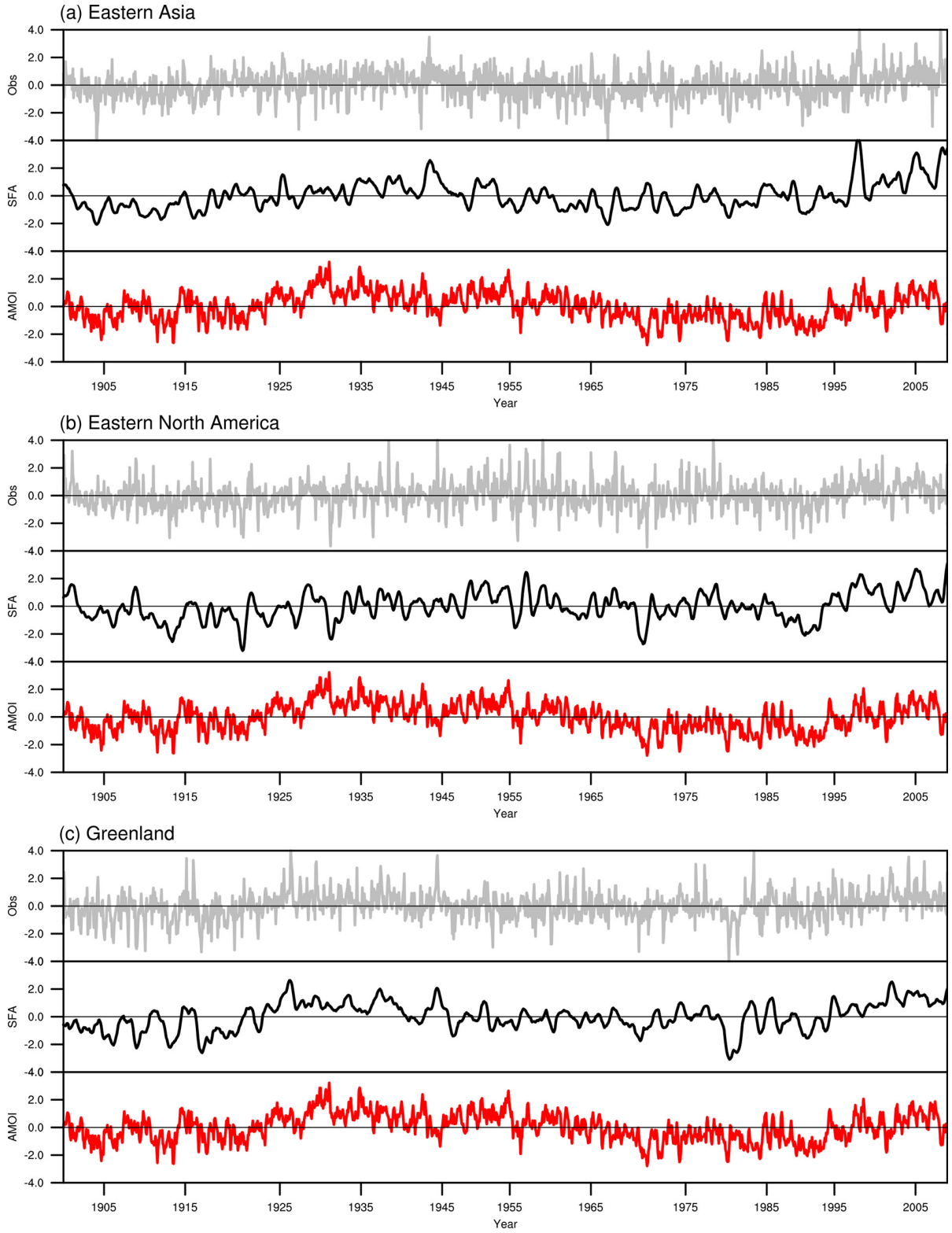

图 4 同图 2，但为（a）东亚地区（17°～37°N，90°～110°E）、（b）北美洲东部（43°～63°N，49°～69°W）、(c) 格陵兰岛地区（58°～78°N，37°～57°W）区域月平均 LSAT 和逐月 AMO 指数。红线表示逐月 AMO 指数，灰线表示观测 LSAT，黑线表示 SFA 方法提取的 LSAT 慢变驱动力

Fig. 4 As in Fig. 2, but for the regional mean monthly LSAT in East Asia (17°–37°N, 90°–110°E), eastern North America (43°–63°N, 49°–69°W), and Greenland (58°–78°N, 37°–57°W) and the monthly AMO index（AMOI）. The red lines represent the monthly AMOI. The gray line represents the original observed LSAT. The black line represents the LSAT slow driving force extracted by the SFA method

3.3　El Niño 对 LSAT 的影响

在典型的 El Niño 年，赤道太平洋东西海温出现异常，温度、气压梯度减小，赤道东风减弱，Walker 环流减弱，对流旺盛区和上升支东移，Hadley 环流相应减弱，西太平洋副热带高压的位置比往年偏南，西太平洋地区由于对流减弱，往往更加干旱；而东亚地区季风出现异常，进而引起 LSAT 出现变化。强 El Niño 年还能引起北太平洋和北美地区大气环流的变化，冬季盛行期间阿留申低压和“太平洋—北美”PNA（Pacific–North America）大气遥相关型的 500 hPa 位势高度出现异常（马杰, 2007），进而导致北美洲温度发生异常变化。

图 5a 显示，全球大部分地区 LSAT 与 Niño3.4 指数显著相关，特别是太平洋周边和低纬度地区，包括澳洲部分地区。具体来说，北美洲北部、东南亚部分地区、南美洲、非洲、印度次大陆和澳洲地区的 LSAT 与 Niño3.4 指数具有一致显著的相关关系，欧洲东北部、北美洲南部和南极洲部分地区则呈现显著且一致的相关性。图 5b 显示，在北美洲、印度次大陆、南亚地区、非洲和澳洲等地区，SFA 提取的慢变驱动力与 Niño3.4 指数的相关系数的绝对值明显增大，进一步证明 ENSO 对这五大地区的 LSAT 有很大的影响。

当赤道东太平洋异常增暖（El Niño）时，北美洲南部和欧洲东北部 LSAT 出现负异常。有研究表明太平洋地区存在 PNA 大气遥相关模式，当北太平洋出现异常加深的阿留申低压时，西风增强且赤道太平洋中部降水增多，随着西风的增强，北美洲南部的温度则出现负异常（Yeh et al., 2018）。

在印度次大陆和东南亚地区，有学者提出海洋充电-放电的理论，El Niño 在冬季达到鼎盛时，印度洋在冬季后期和春季出现异常温暖的现象，从而加强亚洲夏季西南季风，导致印度和东南亚地区的陆地温度出现正异常（Timmermann et al., 2018）。基于此，有学者利用 NAO 和 ENSO 对东亚夏季风进行经验模型的预测（Wu et al., 2009）。

为了进一步研究 ENSO 对局地 LSAT 的影响，本文选取了三个地区，分别是北美洲南部（18°～38°N，88°～108°W）、印度地区（15°～20°N，70°～80°E）和中南半岛（7°～27°N，91°～111°E），以此来分析这些地区的 LSAT 与 Niño3.4 指数的相关性。

图 6 说明三个地区与 Niño3.4 指数特征非常相似，都有十分明显的年际变化特征，并且，SFA 提取的 LSAT 慢变驱动力信号依旧存在明显的年际变化特征，甚至在逐月时间尺度上，与 Niño3.4 指数有很好的相关性。表 3 显示，北美洲南部地区观测 LSAT 与 Niño3.4 指数的相关系数仅有−0.16，而 SFA 提取的慢变驱动力信号与 Niño3.4 指数的相关系数达到−0.32，相关系数的绝对值增加了将近一倍，解释方差增加了 8%；印度次大陆的观测 LSAT 与 Niño3.4 指数也只有 0.26，SFA 提取的慢变驱动力信号与其相关系数达到 0.45，解释方差增长将近 13%；同样，中南半岛地区的观测 LSAT 和驱动力与 Niño3.4 指数的相关系数分别为 0.19 和 0.32，解释方差增加了 7%。以上结果表明，

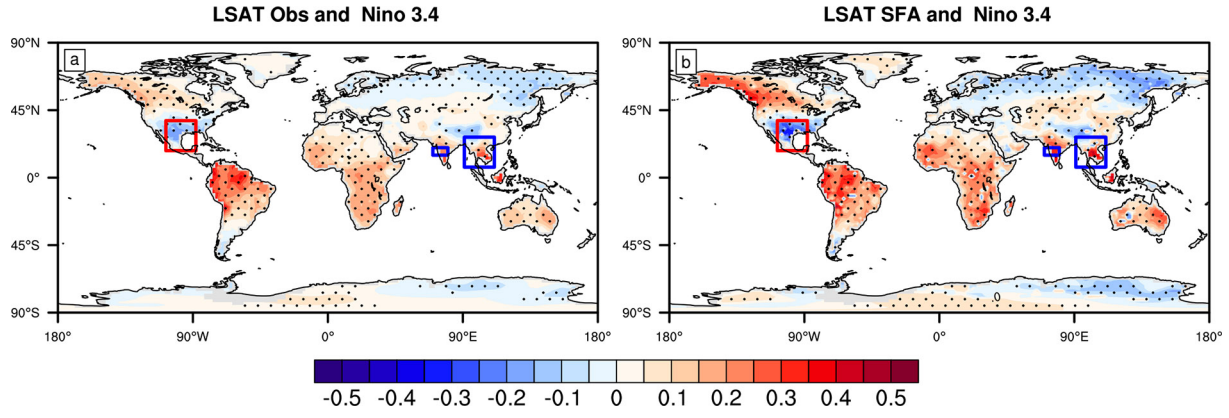

图 5　同图 1，但为 1901～2009 年（a）观测 LSAT、（b）SFA 方法提取的 LSAT 慢变驱动力与逐月 Niño3.4 指数的相关系数的空间分布。方框区域分别为北美洲南部（18°～38°N，88°～108°W）、印度地区（15°～20°N，70°～80°E）、中南半岛（7°～27°N，91°～111°E）

Fig. 5　As in Fig. 1, but for correlation of (a) the original observed LSAT and (b) the LSAT slow driving force extracted by the SFA method with the monthly Niño3.4 index. The boxes represent southern North America (18°–38°N, 88°–108°W), India (15°–20°N, 70°–80°E), and the Indo-China Peninsula (7°–27°N, 91°–111°E)

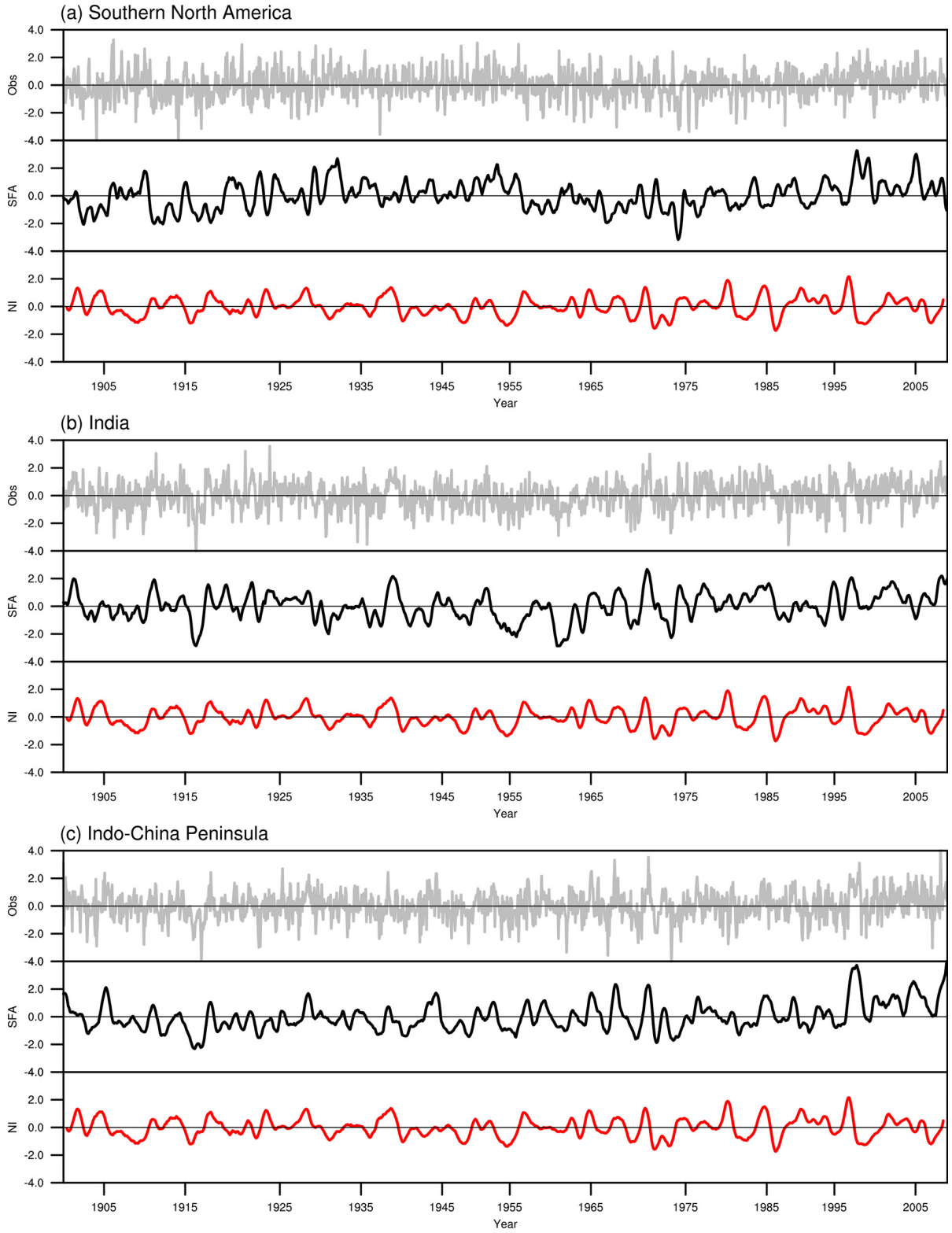

图 6 同图 2，但为（a）北美洲南部（18°～38°N，88°～108°W）、（b）印度地区（15°～20°N，70°～80°E）、（c）中南半岛（7°～27°N，91°～111°E）区域月平均 LSAT 和逐月 Niño3.4 指数。红线为逐月 Nino3.4 指数经过 12 个月滑动平均的标准化时间序列，灰线表示观测 LSAT，黑线表示 SFA 方法提取的 LSAT 慢变驱动力

Fig. 6 As in Fig. 2, but for the regional mean monthly LSAT in southern North America (18°–38°N, 88°–108°W), India (15°–20°N, 70°–80°E), and Indo-China Peninsula (7°–27°N, 91°–111°E) and the monthly Niño3.4 index (NI). The red lines run through the 12-month moving average The gray line represents the original observed LSAT. The black line represents the LSAT slow driving force extracted by the SFA method

表 3　同表 1，但为逐月 Niño3.4 指数

Table 3　As in Table 1, but for the monthly NI

	相关系数			解释方差		
区域	原始序列	SFA方法提取的慢变驱动力	增长量(绝对值)	原始序列	SFA方法提取的慢变驱动力	增长量
北美洲南部	−0.16	−0.32	0.16	3%	10%	8%
印度	0.26	0.45	0.19	7%	20%	13%
中南半岛	0.19	0.32	0.13	4%	10%	7%

SFA 提取的慢变驱动力信号与 Niño3.4 指数之间的相关系数的绝对值明显增大，解释方差也有大幅度的增长，进一步说明 El Niño 在年际尺度上对这些地区 LSAT 有很强的影响。

Niño3.4 指数与观测 LSAT 以及 SFA 提取的慢变驱动力的相关系数对比结果表明，ENSO 事件影响 LSAT 的主要区域范围为太平洋周边地区，包括北美洲、欧亚大陆，赤道低纬度地区以及南半球大部分地区，特别是北美洲北部和南部、南美洲中部、欧亚大陆东北部、非洲中南部、澳洲、南亚和中南半岛地区 LSAT，与实际观测相比，可能受到 ENSO 的更大影响。

3.4　PDO 对 LSAT 的影响

有研究利用模式数据得出，PDO 作为太平洋海温模态之一，在外部辐射强迫的作用下，通过热量在海洋表层和深层的传递，对全球增暖加剧和停滞有重要影响（Meehl et al., 2013）。有研究表明 PDO 由负位相变为正位相，欧亚大陆和北太平洋之间的海陆温度差异减弱，海陆风减弱，陆地温度出现负异常（Newman et al., 2016）。本节介绍了 PDO 对全球 LSAT 不同区域的影响。

有研究证明 PDO 可以通过阿留申低压引起副热带太平洋地区和北美西部出现异常高压，在大气中引发北太平洋涛动现象（NPO, North Pacific Oscillation），还可以通过 PNA 遥相关型影响北美气候。其也可以通过阿留申低压和西伯利亚高压影响东亚大气环流，进而影响我国气候的年代际变化（朱益民和杨修群, 2003; 杨修群等, 2004）。

以往研究表明，PDO 的空间格局与 ENSO 相似，但二者在时间尺度上存在差异：ENSO 是年际尺度，PDO 是年代际尺度，大多数学者认为 PDO 可作为 ENSO 的年代际背景，二者对不同地区 LSAT 的影响存在较大的差异。图 7 和图 5 对比表明，即 PDO、Niño3.4 两大气候指数与 LSAT（以及驱动力）的相关系数的空间分布图显示，PDO 与 Niño3.4 指数的结果十分相似，相关性显著区域基本一致，但是 PDO 的影响范围更广，强度更大。图 7 表明，PDO 与北美洲北部、东亚部分区域（中南半岛）、印度次大陆、南美洲、非洲和澳洲地区的 LSAT 呈现相同的相关关系，与欧洲东北部、

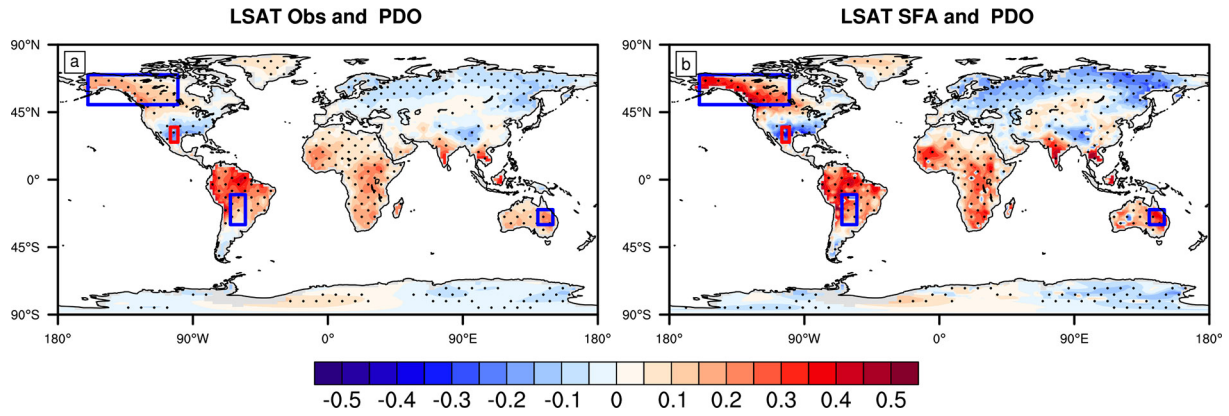

图 7　同图 1，但为 1901～2009 年（a）观测 LSAT、（b）SFA 方法提取的 LSAT 慢变驱动力与逐月 PDO 指数的相关系数的空间分布。方框区域分别为北美洲西北部（50°～70°N，100°～160°W）、南美洲中部（10°～30°S，55°～65°W）、澳洲东部（20°～30°S，140°～150°E）、北美洲南部（25°～35°N，100°～105°W）

Fig. 7　As in Fig. 1, but for correlation of (a) the original observed LSAT and (b) the LSAT slow driving force extracted by the SFA method with the monthly PDO index. The boxes represent northwestern North America (50°–70°N, 100°–160°W), central South America (10°–30°S, 55°–65°W), Australia (20°–30°S, 140°–150°E), and southern North America (25°–35°N, 100°–105°W)

北美洲南部地区的 LSAT 有一致的影响。与 Niño3.4 指数相比，PDO 对欧亚大陆北部地区、南美洲中部地区、北美洲、澳洲以及一些高纬度地区的 LSAT 有更强的影响。其中的原因可能是高纬度地区的 LSAT 在更大程度上受太平洋年代际海温模态的影响。为了进一步分析 PDO 对局地 LSAT 的影响，我们分别选取了北美洲西北部（50°～70°N，100°～160°W）、南美洲中部（10°～30°S，55°～65°W）、澳洲（20°～30°S，140°～150°E）和北美洲南部（25°～35°N，100°～105°W）四个地区来具体分析。

图 8 显示，美洲、澳洲地区的 LSAT 逐月观测时间序列存在着很明显的年际和年代际变化特征，而 SFA 提取的 LSAT 慢变信号表现出明显的年代际变化特征，且与 PDO 年代际变化较为一致，如 1910～1920 年前后均有“上升”—“下降”—“上升”的年代际变化特征。由此，可见 PDO 对 LSAT 的年代际变化有很大的影响。表 4 显示，北美洲西北部地区的观测月 LSAT 异常与 PDO 的相关系数为 0.18，SFA 提取的慢变驱动力信号却能达到 0.35，增加了将近一倍，解释方差增加了 9%。

位于南半球的南美洲地区与澳洲地区，同样受到 PDO 的影响。在表 4 中，南美洲观测 LSAT 与 PDO 的相关性仅为 0.16，SFA 提取的慢变驱动力

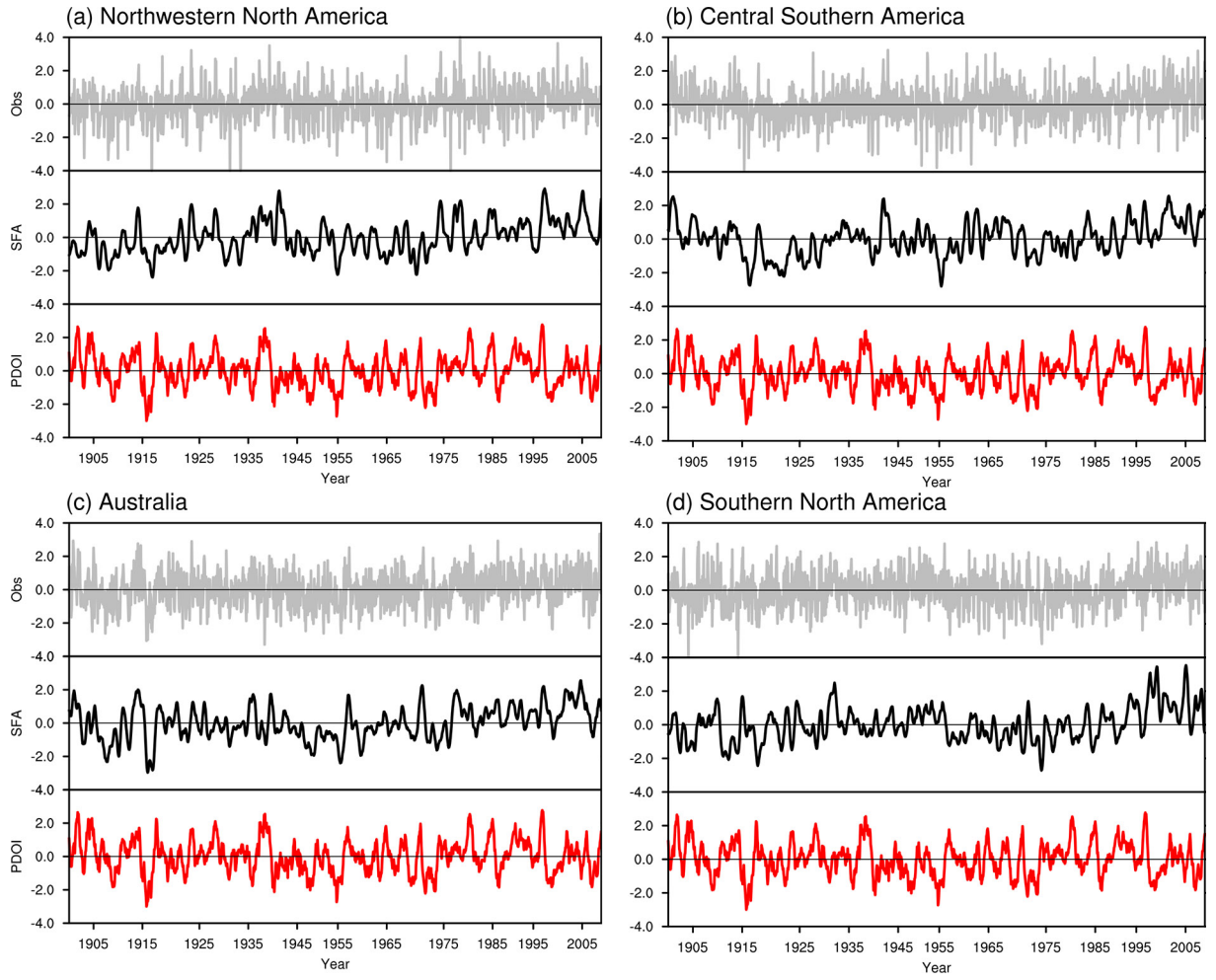

图 8　同图 2，但为（a）北美洲西北部（50°～70°N，100°～160°W）、（b）南美洲中部（10°～30°S，55°～65°W）、（c）澳洲（20°～30°S，140°～150°E）、（d）北美洲南部（25°～35°N，100°～105°W）区域月平均 LSAT 和逐月 PDO 指数。红线表示逐月 PDO 指数，灰线表示观测 LSAT，黑线表示 SFA 方法提取的 LSAT 慢变驱动力

Fig. 8　As in Fig. 2, but for the regional mean monthly LSAT in (a) northwestern North America (50°–70°N, 100–160°W), (b) central South America (10°–30°S, 55°–65°W), (c) Australia (20°–30°S, 140°–150°E), and southern North America (25°–35°N, 100°–105°W) and the monthly PDO index (PDOI)The red lines represent the monthly PDOI. The gray line represents the original observed LSAT. The black line represents the LSAT slow driving force extracted by the SFA method

表 4　同表 1，但为逐月 PDO 指数

Table 4　As in Table 1, but for the monthly PDOI

区域	相关系数			解释方差		
	原始序列	SFA方法提取的慢变驱动力	增长量(绝对值)	原始序列	SFA方法提取的慢变驱动力	增长量
北美洲西北部	0.18	0.35	0.17	3%	12%	9%
南美洲中部	0.16	0.32	0.16	3%	10%	8%
澳洲	0.22	0.37	0.15	5%	14%	9%
北美洲南部	−0.21	−0.38	0.17	4%	14%	10%

信号与其的相关性达到 0.32，相关系数绝对值增加了一倍，解释方差增加了 8%；澳洲地区观测 LSAT 与 PDO 的相关系数为 0.22，SFA 提取的慢变驱动力信号与其相关系数达到 0.37，解释方差增加了 9%。值得注意的是，北美洲南部地区受 PDO 的影响也显著增强，观测 LSAT 与 PDO 的相关系数为−0.21，SFA 提取的慢变驱动力信号与 PDO 的相关系数绝对值达到 0.38，相关系数的绝对值显著增加，解释方差也增加了 10%。因此，可以说 PDO 对这四个地区 LSAT 具有非常明显的影响，进一步证明 PDO可能是太平洋周边尤其是高纬度地区 LSAT 低频变率的重要驱动力之一。

PDO 作为北太平洋 SST 的重要模态，对全球 LSAT 有重要的影响。PDO 与 ENSO 相比，对 LSAT 的影响范围更广，普遍扩展到热带外地区。本文研究结果说明受 PDO 影响的区域不仅包括 Niño3.4 指数的显著区域，如太平洋周边陆地，如南北美洲、非洲、澳洲和欧亚大陆中南部，还包括北半球北部中高纬度地区，如欧亚大陆北部地区。且 PDO 作为太平洋北部海温模态在更高纬度上影响 LSAT 的低频变率。与此同时，PDO 在年代际尺度上对北太平洋和欧亚大陆的大气环流造成重要影响。

本文利用 SFA 方法提取非平稳动力系统 LSAT 的慢变驱动力，来探究 LSAT 变化的内部机制。本章节将全球观测 LSAT 与 SFA 提取的慢变驱动力信号分别与 GRF、AMO、Niño3.4 和 PDO 指数做相关分析，发现 GRF 对全球 LSAT 整体有显著影响，包括南极洲地区，相关性均非常显著。AMO 对北半球 LSAT 中低纬度地区有重要影响，特别是北大西洋周边地区（北美洲东北部地区、格陵兰岛地区）和东亚地区 LSAT 有显著一致的相关关系（Muller et al., 2013），并且在多年代际尺度上与 LSAT 有密切的联系。Niño3.4 指数与大多数热带地区 LSAT 显著相关，而 PDO 指数结果与其相似，但是相关系数更大，范围更广，特别是在热带外地区，比如 PDO 与北美洲北部、澳洲东部和欧亚大陆北部等中高纬度地区有显著的相关关系。选区结果表明，与观测 LSAT 时间序列相比，SFA 方法提取的慢变驱动力与四个指数的相关系数绝对值明显增大，解释方差也明显增加。以上结果说明 LSAT 确实受 GRF、AMO、Niño3.4、PDO 气候指数的显著影响。而且，从解释方差来看，三大 SST 模态与观测 LSAT 的解释方差并不高，而且均不超过 10%，而 SFA 方法提取的慢变驱动力与三大 SST 模态的解释方差均超过 10%，有的甚至达到 20%（Niño3.4 指数与印度地区平均 LSAT 慢变驱动力的解释方差）。

4　模式验证

为了验证三大 SST 模态是 LSAT 低频变率的重要驱动力，我们利用 CAM5 模式设计的 AMIP 试验进行分析。AMIP 试验是基于海表温度作为下垫面条件来驱动的大气环流模式，因此可以反映海温对大气环流和陆地气温的强迫作用。本文综合模式中 10 个集合的平均结果，减少了大气内部过程对 LSAT 的影响，保留了辐射和海温等对 LSAT 的影响。通过分析 AMIP 试验模拟出的 LSAT 与 AMO、Niño3.4、PDO 指数的相关分析结果，进一步说明三个 SST 模态对 LSAT 低频变率有重要作用。以往有研究通过观测的海面温度（不包括人为变暖）强迫进行大气模型模拟试验，证明观测到的海上风应力异常，即太平洋信风的减弱/增强，与全球表面增温/降温有很好的一致性，进而证明年代际自然气候变率对实际观测到的全球平均表面温度有重要贡献（Nakaegawa et al., 2004; Watanabe et al., 2014）。

已有研究结果表明，GRF 与 LSAT 的相关性在全球范围内非常显著（Forest et al., 2006; Hansen et al., 2011; 张华和黄建平, 2014; Marvel et al., 2016），并且在模式结果中整体呈现显著正相关特

征，所以在本节中不做介绍。

本节利用模式模拟出的 LSAT 分别与 AMO、Niño3.4、PDO 气候指数分别做空间相关分析，得出 LSAT 与 AMO、Niño3.4 和 PDO 三个气候指数同期相关系数的空间分布图。结果表明，AMO、El Niño 和 PDO 分别对 LSAT 有重要的影响。

4.1 AMO 对 LSAT 的影响

图 9 显示，全球范围内大部分地区 LSAT 与 AMO 有很强的相关性，在大西洋周边地区（北美洲东部、格陵兰岛、南美洲）（Weaver et al., 2009; Merrifield and Xie, 2016）、阿拉伯海周边地区、欧亚大陆大部分地区、非洲北部和南部地区都呈现显著的正相关关系。与实际观测结果相同，AMO 对北半球的陆地温度有较大影响，尤其是大西洋周边以及中低纬度地区。而 AMO 对东亚部分地区的影响与实际观测结果有一定偏差。据相关系数的分布图显示，亚洲的高值区距离选定的东亚地区偏东一点。而且，AMO 对非洲部分北部和南部地区有明显显著的影响，例如非洲北部、大西洋沿岸和非洲东南部地区，而非洲中部地区没有明显影响。在南极洲，模拟结果与观测结果一致，但是与 SFA 提取的慢变驱动力的结果相差较大。总的来说，模拟与观测结果一致，AMO 对大西洋周边地区和亚洲大部分地区 LSAT 有非常重要的影响。

4.2 El Niño 对 LSAT 的影响

图 10 模式结果显示，全球 LSAT 受到 ENSO 的显著影响，特别是太平洋周边和赤道低纬度地区，包括南半球陆地整体受到其显著影响。在北美洲西北部、南美洲、格陵兰岛、非洲、澳洲和东亚等地区，LSAT 受到 Niño3.4 指数显著一致的影响；在北美洲南部、欧亚大陆北部以及南美洲南部地区有明显一致的相关关系。此前也有模式模拟结果表明热带太平洋海温可以强迫出北美冬季（1982 年 12 月至 1983 年 3 月）平均地表温度异常（Hoerling and Kumar, 1997; 容新尧和杨修群, 2004, 2005），东亚季风受到 ENSO 的显著影响（Ju and Slingo, 1995），本文结果与其基本一致。

模式结果与观测结果对比表明，Niño3.4 指数与北美洲南部、印度南部和东亚地区的 LSAT 的相关性非常显著。但在印度中北部，模式模拟试验未能模拟出与实际观测相同的结果。这可能是因为模式选用的 AMIP 观测海洋模式，没有增加气候系统中海洋—大气反馈，而太平洋与印度洋之间这种反馈非常复杂，所以未模拟出想要的结果。总而言之，Niño3.4 指数对太平洋周边和赤道低纬度地区 LSAT 的影响较大。

4.3 PDO 对 LSAT 的影响

模式模拟结果与实际观测结果一致的是，

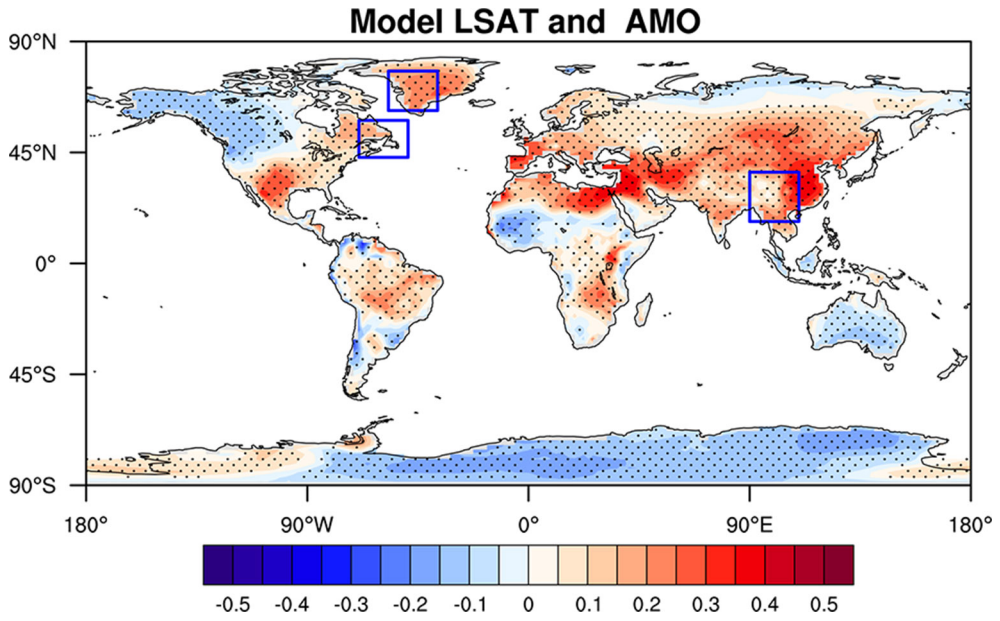

图 9 AMIP 试验 10 个集合平均 1901～2009 年的 LSAT 与逐月 AMO 指数同期相关系数的空间分布。方框内为据观测结果选择的关键区，黑色打点区域代表通过 95% 的信度水平检验

Fig. 9 Correlation of the ten sets averaging LSAT simulated by the AMIP experience with the monthly AMO index for the same period from1901–2009. The boxes represent the key areas selected according to the observation results, regions above 95% confidence level are black spotted

PDO 与 Niño3.4 指数的结果相似。图 11 表明，PDO 在北美洲西北部、南美洲、非洲、澳洲、东亚部分地区（中南半岛）、以及印度次大陆南部等区域呈现一致且显著较强相关，在北美洲南部、欧洲东北部和南美洲南部等部分区域呈现一致显著相关。值得注意的是，PDO 指数与北美洲西北部和南部、南美洲中部和澳洲东北部四个地区的 LSAT 的相关系数绝对值能够达到 0.5。图 10 和图 11 表明，与 Niño3.4 指数的模式模拟结果相比，PDO 指数对欧洲东北部的影响更大，而对格陵兰岛地区 LSAT 的影响较小。此外，以往模式结果表明 PDO 对澳洲西海岸海水表面异常增温有重要的影

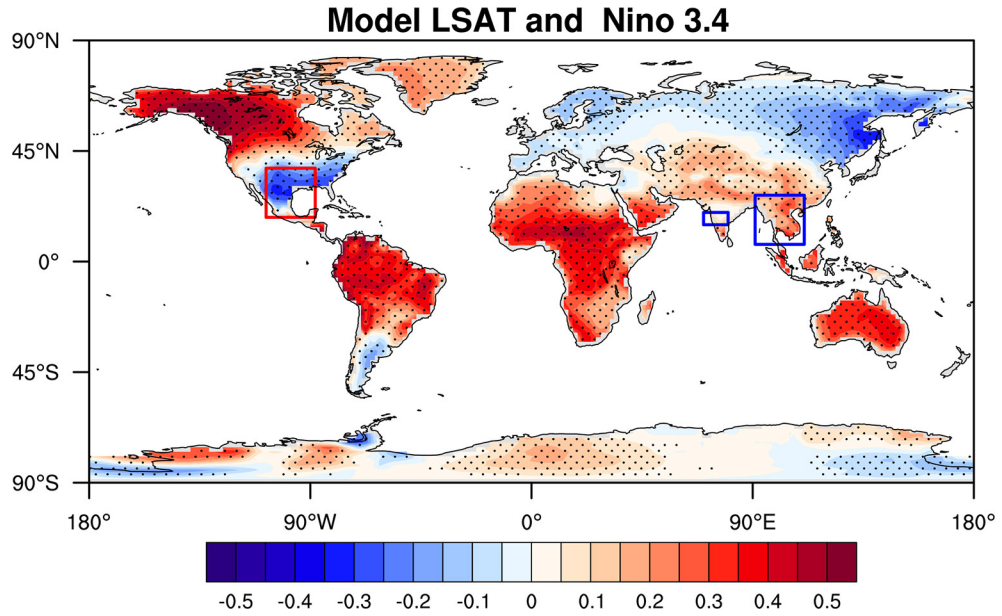

图 10　同图 9，但为 AMIP 试验 10 个集合平均 1901～2009 年的 LSAT 与逐月 Niño3.4 指数同期相关系数的空间分布

Fig. 10　As in Fig. 9, but for correlation of the ten sets averaging LSAT simulated by the AMIP experience with the monthly Niño3.4 index for the same period from 1901～2009

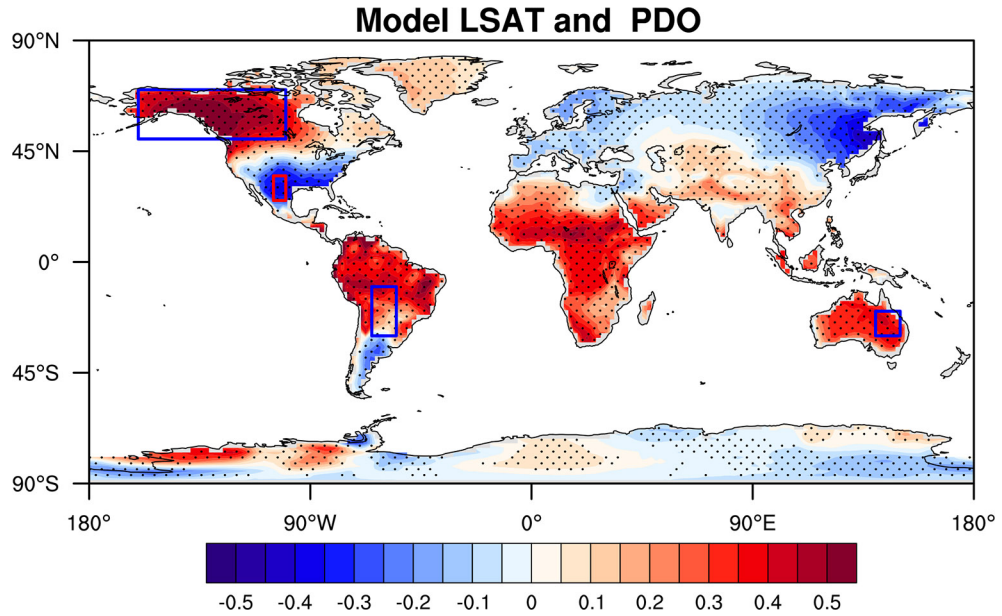

图 11　同图 9，但为 AMIP 试验 10 个集合平均 1901～2009 年的 LSAT 与逐月 PDO 指数同期相关系数的空间分布

Fig. 11　As in Fig. 9, but for correlation of the ten sets averaging LSAT simulated by the AMIP experience with the monthly PDO index for the same period from 1901～2009

响（Tanuma and Tozuka, 2020）。

通过以上三个模式结果，可以得出一致结论：AMO 对北半球中低纬度地区，尤其是大西洋周边地区（北美洲东南部和格陵兰岛）、欧亚大陆南部地区（特别是东亚地区）LSAT 有显著影响；El Niño 和 PDO 对太平洋周边地区（北美洲和南美洲、澳洲、欧亚大陆北部和南部）和赤道低纬度以及南半球 LSAT 有重要的影响。其二者均与北美洲西北部、南美洲中北部、非洲、东亚部分地区和澳洲地区的 LSAT 有一致显著相关关系，与北美洲南部、欧亚大陆北部有一致显著的相关关系。二者比较而言，El Niño 对低纬度地区有较大的影响，而 PDO 对更高纬度地区（如欧亚大陆东北部）有较大的影响。而且，PDO 的影响强度更大，范围更广，可扩展热带外地区。AMIP 模式试验的结果也进一步验证了此前 SFA 提取的 LSAT 慢变驱动力与海温主导模态（AMO、El Niño 和 PDO）之间的密切联系，并且提供了模式证据来说明海温主导模态是 LSAT 低频变率的重要驱动力。

5 总结与讨论

近年来，SFA 方法被应用于气候变化研究领域，用于探究气候变化的潜在驱动力及相关的动力学机制。以往研究多聚焦某个区域平均气候要素的慢变驱动力分析，而一维时间序列在分析包含时—空协同演变信息的多维数据方面有局限性。全球范围内，不同地区气候要素慢变驱动力之间的关系以及慢变驱动力的空间结构特征尚不清楚。本文以 LSAT 为例，将 SFA 方法拓展到多维时空的 LSAT 场中研究其低频变率特征及驱动力，并且与气候系统外部辐射强迫（GRF）和主要的气候系统内部变率（AMO、Niño3.4 和 PDO）进行对比分析，揭示了 LSAT 慢变驱动力与外部强迫和内部变率因子之间的紧密联系，以及 LSAT 对这些驱动因子响应的空间特征。结合数值模式结果验证了内部变率是区域 LSAT 低频变化的重要驱动力。结论具体如下：

（1）GRF 对 LSAT 变率的影响有全球一致性的特征。AMO 对北半球 LSAT 变率有很大影响，特别是中低纬度地区。在大西洋周边、格陵兰岛和南亚地区，LSAT 变率与 AMO 指数有一致显著的相关关系。Niño3.4 指数与 PDO 指数的显著性区域有很大的相似性，在北美洲西北部、南美洲大部分地区、非洲、澳洲和亚洲南部，包括印度次大陆有一致显著的相关关系，在北美洲南部、欧亚大陆北部和东部有一致显著的相关关系。不同的是，PDO 作为北太平洋海温模态，其影响范围和强度明显增强，可扩展到热带外地区。

（2）SFA 方法提取出的 LSAT 驱动力作为气候系统的慢变驱动力信号的组合，能够有效地降低时间序列中噪声信号的干扰。与实际观测相比，GRF 和三大 SST 模态与 SFA 提取 LSAT 的慢变驱动力之间的相关系数绝对值明显增大，对 LSAT 低频变率的解释方差显著增大。特别是 AMO、Niño3.4、PDO 这三大 SST 模态的解释方差明显增大，基本都在 2 倍以上。

（3）模式结果进一步验证了三个海温模态对 LSAT 变率的重要影响。AMO 对大西洋周边地区（北美洲东北部、格陵兰岛）和南亚地区有很强的影响；El Niño 和 PDO 存在相似特征，与北美洲西北部、南美洲、非洲、澳洲和亚洲南部 LSAT 有一致的强相关关系，而对北美洲南部、欧亚大陆北部和东部 LSAT 存在一致的强相关关系。与观测不同的是，模拟结果中，印度次大陆 LSAT 与 Niño3.4、PDO 显著相关的区域范围较小，可能受到真实地形和季风的影响。

本文分析了 GLSAT 受到 GRF 和三个海温模态（AMO、El Niño、PDO）的影响。在自然界实际存在一些其他的海温模态，如北太平洋环流振荡 NPGO (North Pacific Gyre Oscillation)（Di Lorenzo et al., 2010）、中部型 ENSO（何珊珊等, 2015）等。过去一些研究中关于海温时空模态分析中解释方差较小的海温模态，如 NAO 以及 IOD 等对区域海陆气相互作用存在一定的影响（Messié and Chavez, 2011），对这些模态在区域以及全球气候变化方面的影响可能需要进一步研究。

此外，各种海温模态之间可能存在相互影响，比如协同、拮抗作用（Li et al., 2019）等，所以各个模态相对于气候系统的共同作用以及相互响应有待进一步深入研究。

最后，全球气候系统包括多种要素的共同作用，温度是地球表层系统最重要的一个要素之一，要想揭示全球气候系统的驱动力，可能还需要结合降水等要素，对气候系统进行全面的分析与研究。

参考文献（References）

安然, 冯娟, 李建平, 等. 2019. 评估 IPCC AMIP5 模式对北半球冬季

Hadley 环流与热带海温经向结构关系的模拟 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 55(4): 532−544. An Ran, Feng Juan, Li Jianping, et al. 2019. Relationship of the boreal winter Hadley cell and various tropical SST meridional structures in IPCC AMIP5 models [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science) (in Chinese), 55(4): 532−544. doi:10.16360/j.cnki.jbnuns.2019.04.016

Chen X Y, Tung K K. 2018. Global-mean surface temperature variability: Space-time perspective from rotated EOFs [J]. Climate Dyn., 51(5-6): 1719−1732. doi:10.1007/s00382-017-3979-0

Dai A G, Fyfe J C, Xie S P, et al. 2015. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability [J]. Nature Climate Change, 5(6): 555−559. doi:10.1038/nclimate2605

Deser C, Alexander M A, Xie S P, et al. 2010. Sea surface temperature variability: Patterns and mechanisms [J]. Annual Review of Marine Science, 2: 115−143. doi:10.1146/annurev-marine-120408-151453

Di Lorenzo E, Cobb K M, Furtado J C, et al. 2010. Central Pacific El Niño and decadal climate change in the North Pacific Ocean [J]. Nature Geoscience, 3(11): 762−765. doi:10.1038/ngeo984

范开宇, 王革丽, 李超, 等. 2018. 利用慢特征分析法提取二维非平稳系统中的外强迫特征 [J]. 气候与环境研究, 23(3): 287−298. Fan Kaiyu, Wang Geli, Li Chao, et al. 2018. Extracting the driving force signal from two-dimensional non-stationary system based on slow feature analysis [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23(3): 287−298. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17097

冯娟, 李建平. 2012. IPCC AMIP 模式对西南澳类季风环流的模拟 [J]. 气候与环境研究, 17(4): 409−421. Feng Juan, Li Jianping. 2012. Evaluation of IPCC AMIP models in simulating monsoon-like Southwest Australian circulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(4): 409−421. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10110

Forest C E, Stone P H, Sokolov A P. 2006. Estimated PDFs of climate system properties including natural and anthropogenic forcings [J]. Geophys. Res. Lett., 33(1): L01705. doi:10.1029/2005GL023977

龚道溢, 周天军, 王绍武. 2001. 北大西洋涛动变率研究进展 [J]. 地球科学进展, 16(3): 413−420. Gong Daoyi, Zhou Tianjun, Wang Shaowu. 2001. Advance in the studies on North Atlantic Oscillation (NAO) [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 16(3): 413−420. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2001.03.018

Gong Z Q, Sun C, Li J P, et al. 2020. An inter-basin teleconnection from the North Atlantic to the subarctic North Pacific at multidecadal time scales [J]. Climate Dyn., 54(1-2): 807−822. doi:10.1007/s00382-019-05031-5

Granger C W J. 1969. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods [J]. Econometrica, 37(3): 424−438. doi:10.2307/1912791

Hansen J, Sato M, Kharecha P, et al. 2011. Earth's energy imbalance and implications [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(24): 13421−13449. doi:10.5194/acp-11-13421-2011

何珊珊, 张文君, 祁莉, 等. 2015. 两类厄尔尼诺事件发展年秋季印度洋海温异常特征对比 [J]. 气象学报, 73(3): 515−528. He Shanshan, Zhang Wenjun, Qi Li, et al. 2015. Contrasting SST anomalies over the Indian Ocean between the two types of El Niño events during boreal autumn [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 73(3): 515−528. doi:10.11676/qxxb2015.040

Hoerling M P, Kumar A. 1997. Origins of extreme climate states during the 1982–83 ENSO winter [J]. J. Climate, 10(11): 2859−2870. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<2859:OOECSD>2.0.CO;2

胡淑娟. 2006. 全球大气运动的三维环流分解及大气垂直运动特征的分析 [D]. 兰州大学博士学位论文. Hu Shujuan. 2006. The three-dimensional expansion of global atmospheric circumfluence and characteristic analyze of atmospheric vertical motion [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University.

胡淑娟, 周冰倩, 高晨斌, 等. 2020. 全球大气环流的三型分解理论 [J]. 中国科学: 地球科学, 50(9): 1165–1184. Hu Shujuan, Zhou Bingqian, Gao Chenbin, et al. 2020. Theory of three-pattern decomposition of global atmospheric circulation [J]. Science China Earth Sciences, 63(9): 1248–1267. doi:10.1007/s11430-019-9614-y

IPCC. 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report [M]. Core Writing Team, Pachauri R K, Reisinger A, Eds. Geneva, Switzerland, 104 pp.

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al. , Eds. Cambridge: Cambridge University Press, 1535 pp.

Ji F, Wu Z H, Huang J P, et al. 2014. Evolution of land surface air temperature trend [J]. Nature Climate Change, 4(6): 462−466. doi:10.1038/nclimate2223

Ju J H, Slingo J. 1995. The Asian summer monsoon and ENSO [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 121(525): 1133−1168. doi:10.1002/qj.49712152509

Kang S C, Xu Y W, You Q L, et al. 2010. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau [J]. Environ. Res. Lett., 5(1): 015101. doi:10.1088/1748-9326/5/1/015101

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

Konen W, Koch P. 2009. How slow is slow? SFA detects signals that are slower than the driving force [J]. http://arxiv.org/abs/0911.4397v1. doi:10.48550/arXiv.0911.4397

Konen W, Koch P. 2011. The slowness principle: SFA can detect different slow components in non-stationary time series [J]. International Journal of Innovative Computing and Applications, 3(1): 3−10. doi:10.1504/IJICA.2011.037946

Kosaka Y, Xie S P. 2013. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling [J]. Nature, 501(7467): 403−407. doi:10.1038/nature12534

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

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

李双林, 王彦明, 郜永祺. 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:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2009.03.006

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

Li J P, Zheng F, Sun C, et al. 2019. Pathways of influence of the Northern Hemisphere mid-high latitudes on East Asian climate: A review [J]. Adv. Atmos. Sci., 36(9): 902−921. doi:10.1007/s00376-019-8236-5

Lin J L, Qian T T. 2019. A new picture of the global impacts of El Niño–Southern Oscillation [J]. Scientific Reports, 9(1): 17543. doi:10.1038/s41598-019-54090-5

林霄沛, 许丽晓, 李建平, 等. 2016. 全球变暖“停滞”现象辨识与机理研究 [J]. 地球科学进展, 31(10): 995−1000. Lin Xiaopei, Xu Lixiao, Li Jianping, et al. 2016. Research on the global warming Hiatus [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 31(10): 995−1000. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2016.10.0995

刘珊, 陈幸荣, 蔡怡. 2019. 全球变暖“停滞”研究综述 [J]. 海洋学报, 41(4): 1−14. Liu Shan, Chen Xingrong, Cai Yi. 2019. Review on global warming "hiatus" [J]. Haiyang Xuebao (in Chinese), 41(4): 1−14. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.04.001

刘海涛, 胡淑娟, 徐明, 等. 2007. 全球大气环流三维分解 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37(12): 1679–1692. Liu Haitao, Hu Shujuan, Xu Ming, et al. 2007. Three-dimensional decomposition method of global atmospheric circulation [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 51(3): 386–402. doi:10.1007/s11430-008-0020-9

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. 2014. 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

马杰. 2007. 大气环流圈变化特征以及与 ENSO 的关系 [D]. 兰州大学博士学位论文. Ma Jie. 2007. The variability of the atmosphere circulation cell and its relationship with ENSO [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University.

Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A pacific Interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78(6): 1069−1080. doi:10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2

Marvel K, Schmidt G A, Miller R L, et al. 2016. Implications for climate sensitivity from the response to individual forcings [J]. Nat. Climate Change, 6(4): 386−389. doi:10.1038/nclimate2888

Meehl G A, Hu A X, Arblaster J M, et al. 2013. Externally forced and internally generated decadal climate variability associated with the Interdecadal Pacific Oscillation [J]. J. Climate, 26(18): 7298−7310. doi:10.1175/JCLI-D-12-00548.1

Merrifield A L, Xie S P. 2016. Summer U. S. surface air temperature variability: Controlling factors and AMIP simulation biases [J]. J. Climate, 29(14): 5123−5139. doi:10.1175/JCLI-D-15-0705.1

Messié M, Chavez F. 2011. Global modes of sea surface temperature variability in relation to regional climate indices [J]. J. Climate, 24(16): 4314−4331. doi:10.1175/2011JCLI3941.1

Miller R L, Schmidt G A, Nazarenko L S, et al. 2014. CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISS ModelE2 [J]. J. Adv. Model. Earth Syst., 6(2): 441−478. doi:10.1002/2013MS000266

Muller R A, Curry J, Groom D, et al. 2013. Decadal variations in the global atmospheric land temperatures [J]. J. Geophys. Res. :Atmos., 118(11): 5280−5286. doi:10.1002/jgrd.50458

Nakaegawa T, Kanamitsu M, Smith T M. 2004. Interdecadal trend of prediction skill in an ensemble AMIP–type experiment [J]. J. Climate, 17(14): 2881−2889. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2881:ITOPSI>2.0.CO;2

Newman M, Compo G P, Alexander M A. 2003. ENSO-forced variability of the pacific decadal oscillation [J]. J. Climate, 16(23): 3853−3857. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3853:EVOTPD>2.0.CO;2

Newman M, Alexander M A, Ault T R, et al. 2016. The Pacific Decadal Oscillation, revisited [J]. J. Climate, 29(12): 4399−4427. doi:10.1175/JCLI-D-15-0508.1

潘昕浓, 王革丽, 杨培才. 2017. 利用慢特征分析法提取层次结构系统中的外强迫 [J]. 物理学报, 66(8): 080501. Pan Xinong, Wang Geli, Yang Peicai. 2017. Extracting the driving force signal from hierarchy system based on slow feature analysis [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 66(8): 080501. doi:10.7498/aps.66.080501

潘昕浓, 王革丽, 王鹏飞, 等. 2016. 慢特征分析法在气象上的应用进展 [J]. 气象与环境科学, 39(1): 96−101. Pan Xinnong, Wang Geli, Wang Pengfei, et al. 2016. Progress of slow feature analysis method applied on meteorological research [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 39(1): 96−101. doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2016.01.013

容新尧, 杨修群. 2004. 全球海洋环流模式中上层海洋对表面强迫的响应和调整 I. 年际变率 [J]. 海洋学报, 26(2): 20−36. Rong Xinyao, Yang Xiuqun. 2004. The upper-ocean response and adjustment to surface forcing in an ocean general circulation model I. Interannual variability [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 26(2): 20−36. doi:10.3321/j.issn:0253-4193.2004.02.003

容新尧, 杨修群. 2005. 全球海洋环流模式中上层海洋对表面强迫的响应和调整 II. 年代际变率 [J]. 海洋学报, 27(3): 20−31. Rong Xinyao, Yang Xiuqun. 2005. The upper-ocean response and adjustment to surface forcing in an oceanic general circulation model II. Decadal-to-interdecadal variability [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 27(3): 20−31. doi:10.3321/j.issn:0253-4193.2005.03.003

Schreiber T. 1997. Detecting and analyzing nonstationarity in a time series using nonlinear cross predictions [J]. Phys. Rev. Lett., 78(5): 843−846. doi:10.1103/PhysRevLett.78.843

Schreiber T. 2000. Measuring information transfer [J]. Phys. Rev. Lett., 85(2): 461−464. doi:10.1103/PhysRevLett.85.461

宋斌, 智协飞, 胡耀兴. 2015. 全球变暖停滞的形成机制研究进展 [J].

大气科学学报, 38(2): 145−154. Song Bin, Zhi Xiefei, Hu Yaoxing. 2015. A review of recent studies on global warming hiatus [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 38(2): 145−154. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150105002

苏京志, 温敏, 丁一汇, 等. 2016. 全球变暖趋缓研究进展 [J]. 大气科学, 40(6): 1143−1153. Su Jingzhi, Wen Min, Ding Yihui, et al. 2016. Hiatus of global warming: A review [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(6): 1143−1153. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15242

Sugihara G, May R, Ye H, et al. 2012. Detecting causality in complex ecosystems [J]. Science, 338(6106): 496−500. doi:10.1126/science.1227079

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

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, Hodson D L R. 2007. Climate response to basin-scale warming and cooling of the North Atlantic Ocean [J]. J. Climate, 20(5): 891−907. doi:10.1175/JCLI4038.1

Tanuma N, Tozuka T. 2020. Influences of the Interdecadal Pacific Oscillation on the locally amplified Ningaloo Niño [J]. Geophys. Res. Lett., 47(15): e2020GL088712. doi:10.1029/2020GL088712

Timmermann A, An S I, Kug J S, et al. 2018. El Niño–Southern Oscillation complexity [J]. Nature, 559(7715): 535−545. doi:10.1038/s41586-018-0252-6

Tsonis A A, Deyle E R, May R M, et al. 2015. Dynamical evidence for causality between galactic cosmic rays and interannual variation in global temperature [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 112(11): 3253−3256. doi:10.1073/pnas.1420291112

Tsonis A A, Pan X N, Wang G L, et al. 2019. On the min-max estimation of mean daily temperatures [J]. Climate Dyn., 53(3-4): 1981−1989. doi:10.1007/s00382-019-04757-6

Wang Y M, Li S L, Luo D H. 2009. Seasonal response of Asian monsoonal climate to the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 114(D2): D02112. doi:10.1029/2008JD010929

Wang G L, Yang P C, Zhou X J. 2017. Identification of the driving forces of climate change using the longest instrumental temperature record [J]. Sci. Rep., 7(1): 46091. doi:10.1038/srep46091

Wang G L, Yang P C, Bian J C, et al. 2011. A novel approach in predicting non-stationary time series by combining external forces [J]. Chin. Sci. Bull., 56(28-29): 3053. doi:10.1007/s11434-011-4638-1

Wang G L, Zhang N N, Fan K Y, et al. 2019. Central European air temperature: Driving force analysis and causal influence of NAO [J]. Theor. Appl. Climatol., 137(1-2): 1421−1427. doi:10.1007/s00704-018-2676-1

Watanabe M, Shiogama H, Tatebe H, et al. 2014. Contribution of natural decadal variability to global warming acceleration and hiatus [J]. Nat. Climate Change, 4(10): 893−897. doi:10.1038/nclimate2355

Weaver S J, Schubert S, Wang H L. 2009. Warm season variations in the low-level circulation and precipitation over the Central United States in observations, AMIP simulations, and idealized SST experiments [J]. J. Climate, 22(20): 5401−5420. doi:10.1175/2009JCLI2984.1

Wild M. 2016. Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 7(1): 91−107. doi:10.1002/wcc.372

Wiskott L. 2003. Estimating driving forces of nonstationary time series with slow feature analysis [J]. http://www.arxiv.org/abs/cond-mat/0312317. doi:10.48550/arXiv.cond-mat/0312317

Wu Z W, Wang B, Li J P, et al. 2009. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 114(D18): D18120. doi:10.1029/2009JD011733

Wu Z H, Huang N E, Wallace J M, et al. 2011. On the time-varying trend in global-mean surface temperature [J]. Climate Dyn., 37(3-4): 759−773. doi:10.1007/s00382-011-1128-8

Xiao H X, Zhang F, Miao L J, et al. 2020. Long-term trends in Arctic surface temperature and potential causality over the last 100 years [J]. Climate Dyn., 55(5-6): 1443−1456. doi:10.1007/s00382-020-05330-2

Xie T J, Li J P, Sun C, et al. 2019. NAO implicated as a predictor of the surface air temperature multidecadal variability over East Asia [J]. Climate Dyn., 53(1-2): 895−905. doi:10.1007/s00382-019-04624-4

徐一丹, 李建平, 汪秋云, 等. 2019. 全球变暖停滞的研究进展回顾 [J]. 地球科学进展, 34(2): 175−190. Xu Yidan, Li Jianping, Wang Qiuyun, et al. 2019. Review of the research progress in global warming hiatus [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 34(2): 175−190. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2019.02.0175

Xu Y D, Li J P, Sun C, et al. 2020. Contribution of SST change to multidecadal global and continental surface air temperature trends between 1910 and 2013 [J]. Climate Dyn., 54(3-4): 1295−1313. doi:10.1007/s00382-019-05060-0

杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 2004. 太平洋年代际振荡的研究进展 [J]. 大气科学, 28(6): 979−992. Yang Xiuqun, Zhu Yimin, Xie Qian, et al. 2004. Advances in studies of Pacific Decadal Oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(6): 979−992. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06.15

Yang P C, Wang G L, Zhang F, et al. 2016. Causality of global warming seen from observations: A scale analysis of driving force of the surface air temperature time series in the Northern Hemisphere [J]. Climate Dyn., 46(9-10): 3197−3204. doi:10.1007/s00382-015-2761-4

杨韵, 李建平, 谢飞, 等. 2018. 热带北大西洋模态年际变率的研究进展与展望 [J]. 地球科学进展, 33(8): 808−817. Yang Yun, Li Jianping, Xie Fei, et al. 2018. Progresses and prospects for north tropical Atlantic mode interannual variability [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 33(8): 808−817. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2018.08.0808

Yeh S W, Cai W J, Min S K, et al. 2018. ENSO atmospheric teleconnections and their response to greenhouse gas forcing [J]. Rev.

Geophys., 56(1): 185−206. doi:10.1002/2017RG000568

Yu H P, Wei Y, Zhang Q, et al. 2020. Multi–model assessment of global temperature variability on different time scales [J]. Int. J. Climatol., 40(1): 273−291. doi:10.1002/joc.6209

张华, 黄建平. 2014. 对 IPCC 第五次评估报告关于人为和自然辐射强迫的解读 [J]. 气候变化研究进展, 10(1): 40−44. Zhang Hua, Huang Jianping. 2014. Interpretation of the IPCC fifth assessment report on anthropogenic and natural radiative forcing [J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis (in Chinese), 10(1): 40−44. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.009

Zhang R, Delworth T L, Held I M. 2007. Can the Atlantic Ocean drive the observed multidecadal variability in Northern Hemisphere mean temperature? [J]. Geophys. Res. Lett., 34(2): L02709. doi:10.1029/2006GL028683

Zhang N N, Wang G L, Tsonis A A. 2019. Dynamical evidence for causality between Northern Hemisphere annular mode and winter surface air temperature over Northeast Asia [J]. Climate Dyn., 52(5-6): 3175−3182. doi:10.1007/s00382-018-4317-x

Zhang F, Yang P C, Fraedrich K, et al. 2017. Reconstruction of driving forces from nonstationary time series including stationary regions and application to climate change [J]. Physica A:Statistical Mechanics and its Applications, 473: 337−343. doi:10.1016/j.physa.2016.12.088

朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 61(6): 641−654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61(6): 641−654. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.06.001