氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

基于CCM算法的北半球环状模与东北亚冬季地面气温因果关系的年际变化特征研究

张绿夷 谭桂容 王革丽

Research on the Interannual Variation Characteristics of the Causal Relationship between the Northern Hemisphere Annular Mode and Northeast Asia Winter Surface Air Temperature Based on Convergent Cross Mapping Method

ZHANG L ü yi TAN Guirong WANG Geli

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20049

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

地球系统模式中植被净初级生产力百年尺度时空变化及其与气候的关系

Spatial and Temporal Variations of Net Primary Productivity at Century Scale in Earth System Models and Its Relationship with Climate

气候与环境研究. 2019, 24(6): 663 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18052

冬季与北大西洋涛动相关波列传播特征及对下游气候的影响

Propagation Characteristics of Rossby Wave Trains Associated with the North Atlantic Oscillation in Winter and Their Impacts on Downstream Climate

气候与环境研究. 2019, 24(3): 289 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.17178

香河地区冬季$_2$光解速率的变化特征及其估算方法的建立

Variation Characteristics and Estimation Method of NO_2 Photolysis Rate in Xianghe during Winter

气候与环境研究. 2020, 25(1): 64 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18080

1953~2017年黄河源区气温变化的多尺度特征

Multi-Timescale Features of Surface Air Temperature in the Source Region of the Yellow River during 19532017

气候与环境研究. 2020, 25(3): 333 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19026

基于和数据分析中国北方典型地区气溶胶单次散射反照率的变化趋势

Analysis of the Change Trend of Aerosol Single-Scattering Albedo in the Areas of Northern China Based on AERONET and OMI Data

气候与环境研究. 2019, 24(5): 537 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18006

清江流域水热关系与东亚夏季风的联系

Correlation of Surface Air Temperature and Precipitation in the Qingjiang River basin and Its Connection with the East Asian Summer Monsoon

气候与环境研究. 2020, 25(6): 677 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20035

关注微信公众号，获得更多资讯信息

张绿夷, 谭桂容, 王革丽. 2021. 基于 CCM 算法的北半球环状模与东北亚冬季地面气温因果关系的年际变化特征研究 [J]. 气候与环境研究, 26(1): 106−114. ZHANG Lüyi, TAN Guirong, WANG Geli. 2021. Research on the Interannual Variation Characteristics of the Causal Relationship between the Northern Hemisphere Annular Mode and Northeast Asia Winter Surface Air Temperature Based on Convergent Cross Mapping Method [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (1): 106−114. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20049

基于 CCM 算法的北半球环状模与东北亚冬季地面气温因果关系的年际变化特征研究

张绿夷[1,2] 谭桂容[1] 王革丽[2]

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气候与环境变化国际合作联合实验室，南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室，北京 100029

摘 要 北半球环状模 (Northern Hemisphere Annular Mode, NAM) 是北半球冬季最主要的环流系统，其变化对北半球的冬季气候变率具有重要的影响。现有研究多采用相关、合成等统计方法对 NAM 及气候要素进行研究，鲜少从因果关系的角度来进行分析。本文基于收敛交叉映射（Convergent Cross Mapping, CCM）算法，利用 1960～2018 年美国气候预测中心（Climate Prediction Center, CPC）的 NAM 指数、NCEP/NCAR 再分析资料，分析了 NAM 与东北亚地区冬季地面气温（Surface Air Temperature, SAT）的因果关系的年际变化及其可能的物理机制。结果表明：1）NAM 对东北亚地区冬季 SAT 具有单向因果关系，且其关系的强弱存在年际变化，2006 年、1982 年分别为因果影响的最大值和最小值年。2）冬季 NAM 指数存在显著的 8～9 年尺度主周期，该周期为冬季 NAM 影响东北亚地区 SAT 的驱动因子，其变化在一定程度上影响了 NAM 对东北亚地区 SAT 因果关系的年际变化。3）对比 NAM 对 SAT 影响的因果关系的最大值（2006 年）和最小值（1982 年）年环流形势，可见，高值年（2006 年）NAM 的“跷跷板”结构明显，而低值年（1982 年）NAM 的南北振荡形势并不明显。本文对于分析因果关系的年际、年代际变化给出了一个新的思路。

关键词 北半球环状模（NAM） 收敛交叉映射算法 因果关系

文章编号 1006-9585(2021)01-0106-09 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20049

Research on the Interannual Variation Characteristics of the Causal Relationship between the Northern Hemisphere Annular Mode and Northeast Asia Winter Surface Air Temperature Based on Convergent Cross Mapping Method

ZHANG Lüyi[1,2], TAN Guirong[1], and WANG Geli[2]

1 *Key Laboratory of Meteorological Disaster*, *Ministry of Education/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

2 *Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

收稿日期 2020-04-18；**网络预出版日期** 2020-07-06

作者简介 张绿夷，女，1995 年出生，硕士研究生，主要从事非线性大气动力学研究。E-mail: 970320585@qq.com

通讯作者 王革丽，E-mail: wgl@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划 2017YFC1501804，国家自然科学基金项目 42075054、41575058

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1501804), National Natural Science Foundation of China (Grants 42075054 and 41575058)

Abstract　The Northern Hemisphere Annular Mode (NAM) is the main circulation mode in the Northern Hemisphere in winter, with a significant impact on the winter climate variability in the Northern Hemisphere. There are a number of studies that use statistical methods such as correlation analysis and synthetic analysis to discuss NAM and other climatic factors but rarely with the perspective of causality. In this research, the authors apply the Convergent Cross Mapping (CCM) method and use the NAM index provided by the Climate Prediction Center (CPC) from 1960 to 2018 as well as reanalysis data provided by NCEP/NCAR to analyze the impact of NAM on the winter Surface Air Temperature (SAT) in Northeast Asia. Causality changes its strength and weakness year by year and its possible physical mechanism. Our analysis indicates the following: 1) NAM has a one-way causal relationship with the winter SAT in Northeast Asia, and the strength of the relationship has interannual changes. The maximum and minimum years of causal effects are 2006 and 1982, respectively. 2) The winter NAM index has a significant 8−9-year scale main cycle, which is the driving factor for the winter NAM to affect the SAT in Northeast Asia, and to some extent, its change has affected the interannual change of NAM on the SAT causality in Northeast Asia. 3) Comparing the circulation situation of the maximum (2006) and minimum (1982) years of the causal relationship of the impact of NAM on the SAT, it can be seen that the "seesaw" structure of NAM in the year of maximum causality (2006) is obvious. However, the form of NAM's north–south oscillation in the year of minimum causality (1982) is not obvious. This work may therefore provide a new idea in analyzing the interannual and inter-decadal changes of causality.

Keywords　Northern Hemisphere Annular Mode (NAM), Convergent Cross Mapping method, Causality

1　引言

北极涛动 (Arctic Oscillation, AO)，又称北半球环状模 (Northern Hemisphere Annular Mode, NAM)，是由 Lorenz（1951）最早发现，Thompson and Wallace（1998）重新研究并命名的北半球中高纬度大气环流型。作为北半球气候内部变率的主要模态，NAM/AO 反映了海平面气压（Sea Surface Pressure, SLP）场上中纬度地区和高纬度地区反位相变化的南北振荡形式，伴随着振荡过程会出现中纬度和极区的空气团交换（Rigor et al., 2002），在中纬度地区和极地地区大气质量变化呈现出"跷跷板"结构。NAM/AO 对北美、欧洲以及亚洲的天气和气候有着巨大的影响，并且在冬季尤为明显（Thompson and Wallace, 1998; Thompson et al., 2003; 龚道溢和王绍武, 2003）。NAM 对北半球中纬度地面气温的影响反映了自然变率对地面气温的调控作用（孙诚和李建平, 2012）。

李建平（2005）研究了北半球环状模的物理意义及其与东亚大气环流的关系，并指出 NAM 是大气环流的动力作用所导致，且异常 Ferrel 环流在与 NAM 有关的垂直环流中扮演着关键角色。袁俊鹏和曹杰（2013）对 NAM 的周期变化和突变进行了研究，发现 NAM 的年代际尺度周期突变与外强迫源振荡周期变化有关，但突变前后与 NAM 周期振荡密切相关的外强迫因子却有所不同。梁苏洁等（2019）用拉格朗日观点分析北极涛动指数异常事件中北极近地面冷气团的活动路径，从而反映出 NAM 对地面气温的直接调控作用。张琼和胡永云（2015）及刘艳霞等（2013）指出地面温度与平流层 NAM 指数存在统计上显著的滞后相关关系，平流层 NAM 异常信号可以作为先兆因子来延伸东北亚地区冬季对流层天气预报和季节内气候预报。此外，ENSO 与 NAM 之间存在着较强的相关关系，与 NAM 相关的一部分可预测信号同时受到 ENSO 的影响，了解 NAM 的可预测性对于改善中高纬度气候预报至关重要（L'Heureux et al., 2017）。

然而目前对于 NAM 的研究多基于统计学相关的方法，尽管此类方法可以对物理机理的探讨给出有启发意义的指示，但是它不并具有方向性的讨论，无法阐明过程中是否存在因果关系。因果关系是指一个变量是另一个变量改变的驱动力，具有方向性。变量之间具有相关关系并不意味着两者之间具有因果关系，并且具有因果关系的两个变量之间也不一定存在相关关系（May et al., 2008）。相比于传统的相关性分析方法，因果分析方法能够分析出具有方向性的直接因果关系，更加适用于多变量系统的分析（https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2109.TP.[2019-04-11]）。

Sugihara et al.（2012）提出了收敛交叉映射（Convergent Cross Mapping，CCM）算法，该方法可以检验非线性耦合过程中的因果关系，也可以

检验耦合变量间的时滞因果关系。目前，对于CCM算法的应用已经从生态学延伸到了经济学、流行病学、地球科学等各个领域（Tsonis et al., 2015; Ye et al., 2015; Deyle et al., 2016; Runge et al., 2019）。例如Tsonis et al.（2015）运用CCM算法探究了宇宙射线（galactic cosmic rays, CR）与全球年平均气温（global temperature, GT）、年平均气温增量（ΔGT）之间的动力学联系，并发现尽管宇宙射线变化对20世纪的全球变暖趋势没有显著贡献，但是在年际尺度变率上表现为气候系统中的非传统强迫。最近，Zhang et al.（2019）利用CCM算法，讨论了NAM信号与东北亚地区冬季地面温度（Surface Air Temperature, SAT）的信息传输，NAM作为驱动力影响东北亚地区冬季SAT，但冬季SAT却不是NAM变化的原因。上述工作表明，NAM信号与东北亚地区冬季SAT之间存在着单向因果关系，然而这两者之间的因果关系的强弱在近几十年间是否存在年际（年代际）的变化，这一科学问题值得我们进一步分析研究。因此，本文基于CCM算法，拟探讨*NAM*与东北亚地区冬季SAT之间的因果关系强弱的年际变化特征。NAM作为先兆指示因子，将为提高东北亚地区冬季SAT的预测提供新的思路。

2 资料和方法

2.1 资料

（1）北半球环状模指数（Northern Hemisphere Annular Mode Index, NAMI）：本文使用美国气候预测中心（Climate Prediction Center, CPC）提供的逐日/月NAM指数。

（2）NCEP/NCAR提供的1000 hPa、500 hPa特性层高度上的逐月平均位势高度场和风场资料，1000 hPa逐日/月地面温度（SAT），水平分辨率为2.5°（纬度）×2.5°（经度）。

本文中主要研究的区域为东北亚区域（40°N～50°N，90°E～130°E），时间跨度为1960年12月至2019年2月。冬季定义为12月至次年2月。

2.2 收敛交叉映射（CCM）算法

CCM算法以状态空间重构理论（Packard et al., 1980）和Takens嵌入定理（Takens, 1981）为理论基础，利用变量的重构相空间之间微分同胚的特点，通过相空间之间的相互预测来判断变量之间的因果关系。根据Takens嵌入定理，对于一个给定的一维混沌时间序列，通过选取适当的嵌入维数E和采样间隔τ，就可以重构一个与其原始动力系统在拓扑意义下等价的重构相空间。因果关系可以分为3类：互为因果、单向因果与共同原因。三者在数据上看起来是很难区分的，使用CCM算法，可以将由共同诱因Z导致X和Y发生变化的情况与X导致Y区分开来。CCM算法可以分析多变量、非平稳时间序列中的因果关系。同时能够识别弱耦合动力系统和短期时间序列中的因果关系。CCM算法基于以下思想：如果可以从受影响变量的时间序列中恢复因果变量的状态，则二者可建立因果关系。多维动力学系统的基本信息保留在该系统任意单个变量的时间序列中（Tsonis et al., 2015）。CCM算法运用Takens定理来检测两个变量是否属于同一动力学系统：若变量Y对变量X间存在因果关系，且X是Y的影响因子，则可以从Y的时间历史序列中恢复因果变量X的状态，通过分析变量X和变量Y重构相空间之间的相关性，验证二者之间的因果关系。通过计算预测X和观测X之间的相关系数ρ来量化因果关系的强弱程度。简而言之，如果变量Y的历史数据能够由变量X可靠的推出的程度越高，那么Y到X的因果关系就越强。如果交叉映射的预测能力随时间序列的长度的增加而增大，则可以推断X对Y的直接或间接因果关系。

CCM算法基于Takens嵌入定理和单映射（Simplex Projection）算法。单映射法是一种涉及到在重构相空间上通过邻近点距离指数加权来做核密度估计的邻近算法。对于长度为L的时间序列$\{x(1),x(2),\cdots,x(L)\}$和。设重构相空间的嵌入维度为$E$，采样间隔为$\tau$，那么在$t$时刻重构相空间$M_X$、$M_Y$坐标为：

$$x(t)=\langle X(t),X(t-\tau),X(t-2\tau)\cdots X(t-(E-1)\tau)\rangle,\quad(1)$$

$$y(t)=\langle \boldsymbol{Y}(t),\boldsymbol{Y}(t-\tau),\boldsymbol{Y}(t-2\tau)\cdots \boldsymbol{Y}(t-(E-1)\tau)\rangle,\quad(2)$$

由公式（1）和公式（2）得到重构相空间$\boldsymbol{M_X}=\{\underline{x}(t)\}$、$\boldsymbol{M_Y}=\{\underline{y}(t)\}$。定义$\widehat{\boldsymbol{Y}}(t)|\boldsymbol{M_X}$为从$\boldsymbol{M_X}$坐标通过交叉映射预测得到的$\boldsymbol{Y}(t)$。

首先确定t时刻重构相空间M_X上的向量$x(t)$，并找到距离其最近的E+1个邻近点，离其最近的点记为$\underline{x}(t_1)$，依次类推，第E+1个邻近点记为$\underline{x}(t_{E+1})$。并找到E+1个邻近点在M_Y上的映射点$\underline{y}(t_1),\underline{y}(t_2),\cdots,\underline{y}(t_{E+1})$。则预测得到的$\widehat{\boldsymbol{Y}}(t)|M_X$为

$$\widehat{\boldsymbol{Y}}(t)|M_X = \sum w_i \underline{y}(t_i)\, i = 1 \ldots E+1, \qquad (3)$$

其中w_i是基于M_X上x(t)和它的第 i 个邻近点的距离权重。

$$w_i = u_i / \sum u_j\, j = 1 \ldots E+1, \qquad (4)$$

$$u_i = \exp\{-d[\underline{x}(t), \underline{x}(t_i)]/d[\underline{x}(t), \underline{x}(t_1)]\}, \qquad (5)$$

其中$d[x(t), x(t_i)]$表示两个向量间的欧几里德距离。从变量 Y 到变量 X 的交叉映射（预测）也是类似的定义。

计算$\widehat{\boldsymbol{Y}}(t)|M_X$与$\boldsymbol{Y}(t)$之间的相关系数 ρ。相关系数的计算公式如下：

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{L}(Y(i)-\bar{Y})(\hat{Y}(i)|M_X - \overline{\hat{Y}|M_X})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{L}(Y(i)-\bar{Y})^2 \sum_{i=1}^{L}(\hat{Y}(i)|M_X - \overline{\hat{Y}|M_X})^2}}, \qquad (6)$$

若变量 Y 为变量 X 的驱动力因子，则随着时间序列长度 L 增加，吸引子流形填充，密度增大，邻近点的距离不断缩小，逐渐接近真实的邻近点，则$\{\widehat{\boldsymbol{Y}}(t)|M_X\}$逐渐收敛于$\boldsymbol{Y}(t)$，相关系数 ρ 收敛于 $[0,1]$。

CCM 算法就是在变量 X 的时间序列中寻找变量 Y 的信息，判断变量 X 重构的相空间M_X与变量 Y 重构的相空间M_Y上的点是否一一对应。在 CCM 算法中如果变量 Y 影响变量 X，利用变量 X 的重构相空间M_X预测 Y 时，随着时间序列长度 L 的增大，预测值$\widehat{\boldsymbol{Y}}(t)|M_X$与观测值$\boldsymbol{Y}(t)$的相关系数会逐渐增大，并发生收敛。统计学中，常用相关系数表征两个变量之间变化趋势的方向以及程度，其值范围为 $[-1,1]$，相关系数的绝对值越大，相关性越强；相关系数越接近于 0，相关性越弱。而在 CCM 算法中,表征因果关系强弱的 ρ 则为表示重构相空间中交叉收敛的技巧，其范围为 $[0,1]$，零值代表变量间不存在因果关系，CCM 算法中的 ρ 值与统计意义上的相关系数存在区别。因此，可以将交叉收敛技巧 ρ 值视为表征因果关系强度的指标，ρ 值越大，表明变量间的因果关系强度越强。

3　结果分析

3.1　NAM 对东北亚地区冬季 SAT 影响的因果关系强弱的年际变化

图 1a 给出了 1960～2018 年冬季 NAM（灰线）和同期东北亚地区 SAT（黑线）的两组时间序列。

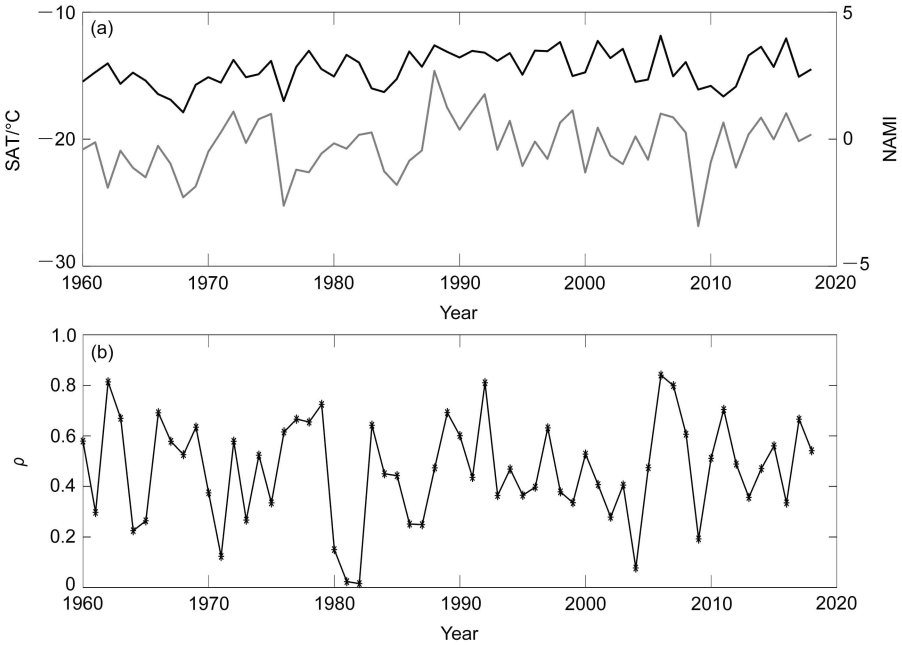

图 1　（a）1960～2018 年冬季平均地面气温（Surface Air Temperature, SAT）时间序列（灰线）、1000 hPa 北半球环状模（Northern Hemisphere Annular Mode, NAM）指数（NAMI）时间序列（黑线）；（b）冬季地面温度与 NAM 因果关系的强弱变化

Fig. 1　(a) Time series of winter average surface air temperature (SAT) from 1960 to 2018 (grey line) and 1000-hPa Northern Hemisphere Annular Mode (NAM) index (NAMI) (black line); (b) intensity change of the causal relationship between ground temperature and NAM in the winter of 1960−2018

可以看出，NAMI 与东北亚地区 SAT在有些年份呈正相关关系，在个别年份却呈现负相关关系，因此，仅用统计方法分析 NAM 与东北亚地区冬季 SAT 相关关系存在一定的局限性。Zhang et al.（2019）运用收敛交叉算法（CCM）分析了对流层、平流层 NAM 与东北亚地区冬季 SAT 的因果关系，结果表明 NAM 与东北亚地区冬季 SAT 均为非线性动力系统，且对流层及平流层 NAM 与冬季 SAT 之间存在着单向因果关系，NAM 是东北亚地区冬季 SAT 的影响因子。在此工作基础上，本文通过计算表征因果关系强度的 ρ 值，来探究二者间因果关系的强度变化特征及可能的物理机制。

图 1b 给出了 1960～2018 年 NAM 对东北亚地区冬季 SAT 影响的因果关系的强度变化特征，可以看出期间表征二者因果关系强度的 ρ 值始终大于 0，说明 NAM 始终是东北亚地区冬季 SAT 变化的原因，但其影响的程度在不同年份有所不同。从年际及年代际变化上看，1960～1971 年、1979～1983 年、1992～2004 年、2006～2018 年呈下降趋势，其中 1979～1982 年的下降幅度最大；1971～1979 年、1982～1992 年、2004～2006 年呈上升趋势。因果关系强弱程度存在着较明显的年际振荡，将因果关系强弱的 ρ 值标准化时间序列中绝对值大于 1.25 个标准差的年份定义为因果关系异常偏大/小年（见表 1），得到 1962 年、1979 年、1992 年、2006 年、2007 年 5 个因果关系强度偏大年，其表征因果关系强度的 ρ 值均在 0.7 以上；1971 年、1980 年、1981 年、1982 年、2004 年、2009 年 6 个因果关系强度偏小年,其 ρ 值均低于 0.2。在其中 2006 年为 NAM 对冬季 SAT 影响最大的年份，其因果关系的强度 ρ 值高达 0.836；1982 年为因果关系影响最小值年份，ρ 值仅为 0.016。

表 1 因果关系强度偏大/小年份

Table 1 Strong and weak years of causality

因果关系强度	年份
偏大	1962、1979、1992、2006、2007
偏小	1971、1980、1981、1982、2004、2009

3.2 因果关系强度年际变化的可能机理分析

为了进一步探究 NAM 对 SAT 影响的因果关系年际变化特征及动力学因素，采用 morlet 小波分析的方法（Torrence and Compo, 1998）对 1000 hPa 的 NAM 指数进行尺度周期分析。

图 2a 为 1960～2018 年冬季 NAM 指数的小波功率谱，冬季 NAM 存在较明显的周期变化，其大体存在 8～9 年、16～18 年、40 年以上的尺度周期，图 2b 为其全谱图，从全谱图可以看出，其主要存在 2～4 年、8～9 年、16～18 年周期，有 3 个特征尺度通过显著性检验，分别是 8～9 年、16～18 年和 40 年以上的周期，其中 8～9 年周期是其主要特

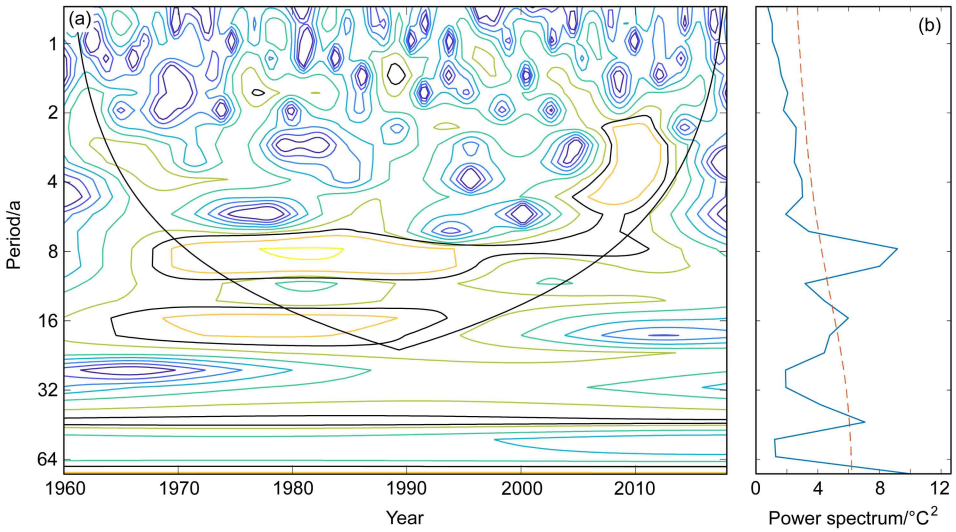

图 2 NAM 指数的（a）小波功率谱（黑色实线轮廓代表白噪声下 95% 的置信水平）和（b）小波全谱图（蓝色实线为小波功率谱曲线，红色虚线为与功率谱一致背景下 95% 的置信水平）

Fig. 2 (a) Wavelet power spectrum of the NAM index (NAMI, the black solid outline represents the 95% confidence level under white noise) and (b) the wavelet full spectrum (the blue solid line is the wavelet power spectrum curve and the red dashed line is consistent with the power spectrum 95% confidence level in the context)

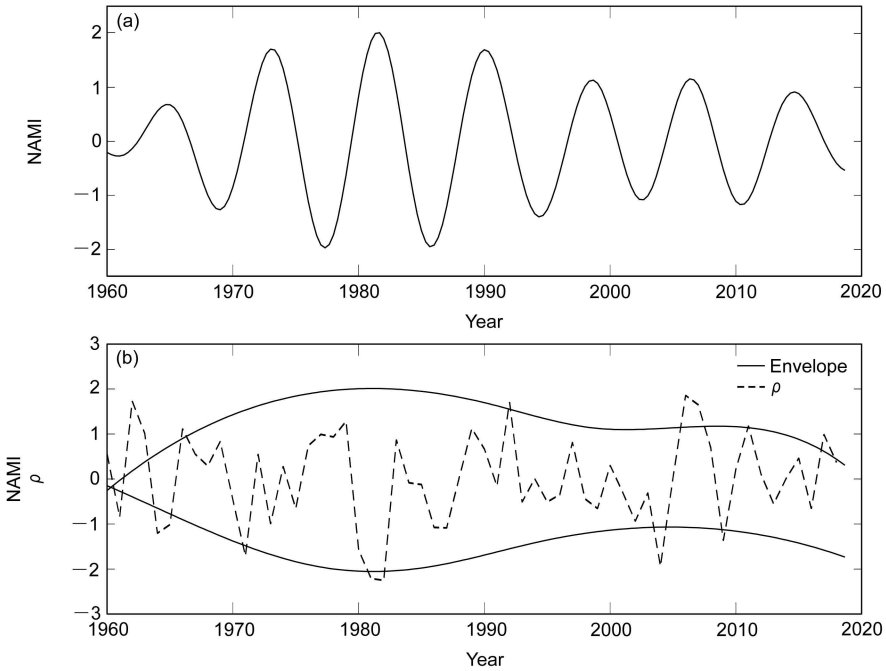

图 3　（a）NAM 的 8～9 年主周期变化、（b）8～9 年周期信号的包络及标准化的因果关系的强弱变化

Fig. 3　(a) NAM's 8–9-year main period variation, (b) the envelope of the 8–9-year period signal and normalized intensity change of the causal relationship

征尺度。

图 3 为 NAM 指数的 8～9 年主周期的变化（图 3a）、该 8～9 年周期信号的包络（图 3b 实线所示）以及标准化后的因果关系的强弱变化（图 3b 虚线所示）进行比较。可以看出，该 8～9 年尺度周期信号具有变幅特征，1960～1980 年期间振幅逐渐增大，随后减小，并在 1998 年后振幅逐渐趋于稳定。且由图 3b 可以看出，1960～2018 年 NAM 对 SAT 的影响大体在 NAM 主周期的包络信号内，说明 NAM 对 SAT 的影响受 NAM 的包络信号所控制；并且 1970～1979 年、1991～2018 年 NAM 对 SAT 影响的因果关系变化和 NAM 主周期上包络线的趋势基本一致，其他年份可能受到 NAM 及其他因子的共同影响。

3.3　因果关系最强和最弱年的环流形势

研究表明，NAM 处于正位相时，极涡加强，极地地区气压为负异常，中纬度地区气压为正异常，导致该地区气温异常偏高；NAM 处于负位相时相反（Gong et al., 2001）。为了更好地理解因果关系强弱变化的机理，本文选择因果关系强度最大值所在年份（2006 年）和最小值所在年份（1982 年）的环流形势进行对比并将表 1 中 NAM 对 SAT 影响的因果强度的偏大和偏小值年份进行合成差值。

图 4a、4b 给出了 2006 年冬季 500 hPa 位势高度场和矢量风场的异常分布。从环流形势上看，高纬地区位势高度场为负异常，高纬地区存在气旋式环流异常，且气旋式环流异常气旋中心位于新地岛以南乌拉尔山一带；中纬地区位势高度场呈正异常，异常反气旋中心位于中国东北地区，东北亚地区西伯利亚高压和东亚大槽减弱，东亚冬季风随之减弱。在这种近极地位势高度场偏低、中纬度位势高度场偏高的环流背景之下，冬季北半球环状模主要是通过影响西伯利亚高压和东亚大槽来影响东亚季风，中纬度西风带加强，从而使得中纬度东北亚地区温度偏高。

图 4c、4d 为 1982 年冬季 500 hPa 位势高度场和矢量风场的异常分布。从环流形式上看，极地与中纬度地区位势高度场没有明显的反位相变化，北半球环状模形式不明显，整个中高纬度地区由西至东呈现“－＋－”的异常波列，冬季风偏弱。东北亚大部分地区位势高度场整体呈正异常，正异常中心位于贝加尔湖以西一带，其多受平直的东风异常气流控制。同时，有研究表明 1982/1983 年为强 EP 型 El Niño 事件（吴正贤等, 1990; 周一博和方明强, 2018），大气对海温的响应更强，El Niño 事件加强了 Hadley环流和经圈环流异常，北半球热带地

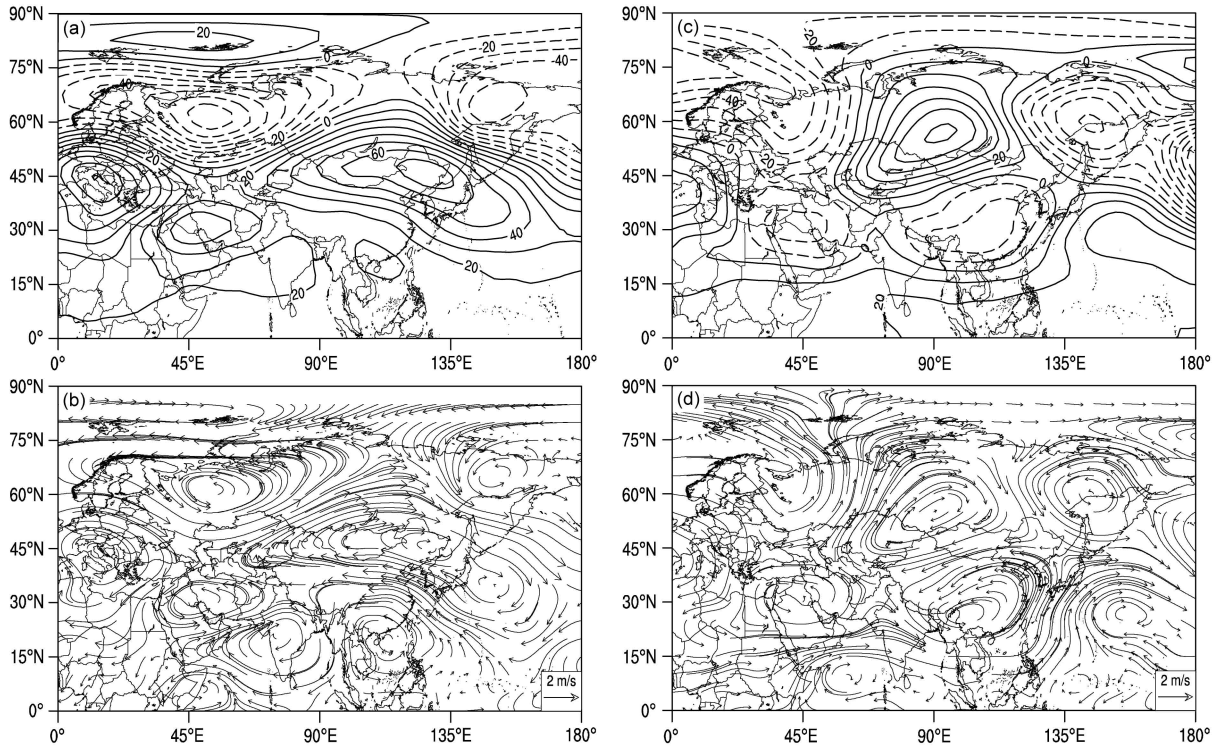

图 4 2006 年（左列）和 1982 年（右列）500 hPa（a、c）位势高度异常场（单位：gpm）和（b、d）矢量风异常场

Fig. 4 (a, c) 500-hPa geopotential height anomaly field (gpm) and (b, d) vector wind anomaly field in 2006.(left panel) and 1982 (right panel)

区东风加强，walker 环流减弱，赤道太平洋海温异常是支配全球气候异常的主要因子（朱乾根等, 1998; 宋文玲和袁媛, 2017），使得东北亚地区温度升高。

综上所述，尽管 2006 年和 1982 年东北亚地区冬季地面温度均有升高，影响其变化的环流背景和机制却有很大差异。2006 年主要是由 NAM 正异常影响，东亚大槽和西伯利亚高压减弱，使得东亚冬季风减弱，从而导致东北亚地区温度异常偏高，因而该年份 NAM 对东北亚地区 SAT 影响的因果关系强度较大。而 1982 年中纬度和高纬度的反位相环流特征不明显，并且 1982 年为强 El Niño 年，受 El Niño 影响大气对海面温度的响应可能更强，NAM 对东北亚地区冬季 SAT 的直接影响变小。

图 5 为 1960～2018 年间因果关系偏大和偏小年 500 hPa 位势高度合成差值。由图可见，在因果关系大值年中高纬和极区，500 hPa 位势高度场呈现出北低南高的“跷跷板”结构，且东北亚大部分地区超过了 90% 的显著性检验，NAM 相对常年更强，东北亚气温受 NAM 的影响较大；而因果关系强度偏小值年 NAM 相对常年偏弱，东北亚气温可能受到 NAM 及其他系统的综合影响。

4 结论与讨论

本文从因果关系的角度出发，利用 CCM 算法、小波分析等方法，探讨了 NAM 与东北亚地区冬季温度 SAT 之间因果关系的年际变化特征及可能的机理。初步结论如下：

（1）NAM 始终是东北亚地区冬季 SAT 变化的影响因子，二者间始终存在单向因果关系，但因果关系强度在 1960～2018 年间出现了较为明显的振荡，具有明显的年际（年代际）变化特征，2006 年、1982 年分别为 NAM 对东北亚地区 SAT 影响的最大值和最小值年。

（2）1960～2018 年间，冬季 NAM 存在显著的 8～9 年主周期振荡，其包络信号的变化是冬季 NAM 影响东北亚地区 SAT 的驱动因子，其变化幅度在一定程度上影响了 NAM 对东北亚地区 SAT 因果关系的大小。

（3）对于环流形势的讨论发现，在因果关系大值年中高纬和极区，500 hPa 位势高度场呈现出北低南高的“跷跷板”结构，NAM 相对常年更强，东北亚气温受 NAM 的影响较大；而因果关系强度偏小值年 NAM 相对常年偏弱，东北亚气温可能受

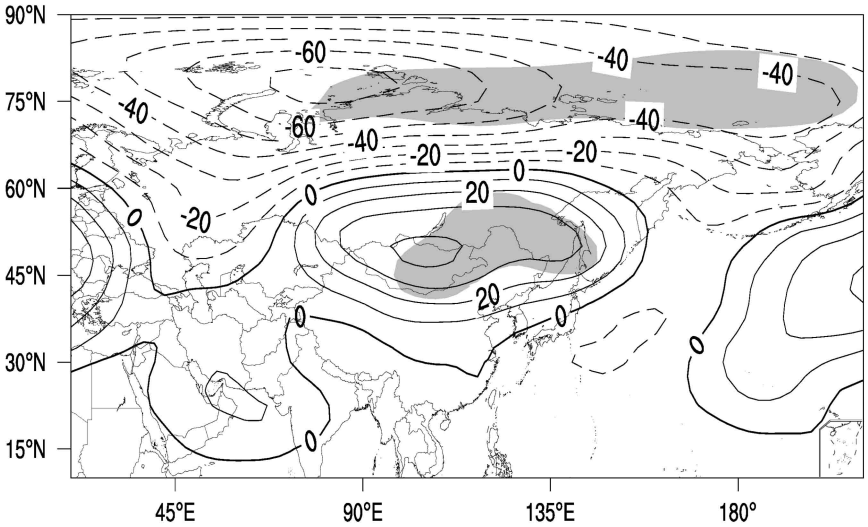

图 5　因果关系强值年份与弱值年份的 500 hPa 位势高度合成差值分布（单位：gpm），阴影区为通过了 0.1 的显著性水平检验

Fig. 5　Combined difference distribution of 500-hPa potential height for strong and weak years in the causal relationship (units: gpm), shaded areas pass the 0.1 significance level

到 NAM 及其他系统的综合影响。

NAM 是冬季东北亚地区 SAT 变化的重要驱动因子。以往研究 NAM 对 SAT 的影响大多基于 NAM 的不同位相，当 NAM 处于正位相时，中纬度和高纬度活动带中气压异常均加强，Ferrel 环流异常加强，东亚地区表面温度升高，NAM 处于负位相时环流型则相反，东亚地区表面温度变化对 NAM 的响应具有一致性（龚道溢和王绍武, 2003; 李建平, 2005; 董仕和肖子牛, 2015）。本文从因果关系的角度，探究了 NAM 对东北亚地区 SAT 的因果关系及其影响的年际变化特征，并探讨了其变化的可能原因。该研究有助于理解 NAM 影响东北亚冬季温度的因果分析的变化和机理，并且 NAM 作为先兆指示因子和大尺度背景信号，可为东北亚地区冬季 SAT 的预测提供科学参考。但是本文仅从因果关系的强弱变化的角度，考虑 NAM 对东北亚地区冬季 SAT 的影响，而气候系统是一个复杂的动力系统，除 NAM 外，El Niño、太阳辐射、北极海冰、人类活动等都是重要的驱动力因子，这些部分将在后续的工作中涉及。

参考文献（References）

Deyle E R, Maher M C, Hernandez R D, et al. 2016. Global environmental drivers of influenza [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 113(46): 13081−13086. doi:10.1073/pnas.1607747113

董仕, 肖子牛. 2015. 冬季北极涛动对东亚表面温度的持续异常影响 [J]. 应用气象学报, 26(4): 422−431.　Dong S, Xiao Z N. 2015. The persistent impact of winter Arctic oscillation on the East Asian surface air temperature [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 26(4): 422−431. doi:10.11898/1001-7313.20150404

龚道溢, 王绍武. 2003. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响 [J]. 地理学报, 58(4): 559−568.　Gong D Y, Wang S W. 2003. Influence of arctic oscillation on winter climate over China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58(4): 559−568. doi:10.11821/xb200304010

Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and arctic oscillation [J]. Geophys. Res. Lett., 28(10): 2073−2076. doi:10.1029/2000GL012311

L'Heureux M L, Tippett M K, Kumar A, et al. 2017. Strong relations between ENSO and the Arctic oscillation in the North American Multimodel Ensemble [J]. Geophys. Res. Lett., 44(22): 11654−11662. doi:10.1002/2017GL074854

李建平. 2005. 北极涛动的物理意义及其与东亚大气环流的关系 [M]//俞永强, 陈文. 海—气相互作用对我国气候变化的影响. 北京: 气象出版社, 169−176.　Li J P. 2005. The Physical Significance of the Arctic Oscillation and Its Relationship with East Asian Atmospheric Circulation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 169−176.

梁苏洁, 赵南, 丁一汇. 2019. 北极涛动主模态下北极冷空气的优势路径和影响地区的研究 [J]. 地球物理学报, 62(1): 19−31.　Liang S J, Zhao N, Ding Y H. 2019. Dominant trajectories and influenced regions of the near-surface cold air in the Arctic during positive and negative AO/NAM events [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 62(1): 19−31. doi:10.6038/cjg2019M0003

刘艳霞, 陈权亮, 郑佳锋. 2013. 北半球环状模变化特征及其对中国冬季气温的影响 [J]. 成都信息工程学院学报, 28(4): 396−401.　Liu Y X, Chen Q L, Zheng J F. 2013. Characteristics of the northern

Annular Mode change and its influence on the winter temperature in China [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 28(4): 396−401. doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2013.04.011

Lorenz E N. 1951. Seasonal and irregular variations of the Northern Hemisphere sea-level pressure profile [J]. Journal of Meteorology, 8(1): 52−59. doi:10.1175/1520-0469(1951)008<0052:SAIVOT>2.0.CO;2

May R M, Levin S A, Sugihara G. 2008. Complex systems-ecology for bankers [J]. Nature, 451(7181): 893−895. doi:10.1038/451893a

Packard N H, Crutchfield J P, Farmer J D, et al. 1980. Geometry from a time series [J]. Phys. Rev. Lett., 45(9): 712−716. doi:10.1103/PhysRevLett.45.712

Rigor I G, Wallace J M, Colony R L. 2002. Response of sea ice to the Arctic Oscillation [J]. J. Climate, 15(18): 2648−2663. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<2648:ROSITT>2.0.CO;2

Runge J, Bathiany S, Bollt E, et al. 2019. Inferring causation from time series in Earth system sciences [J]. Nature Communications, 10(1): 2553. doi:10.1038/s41467-019-10105-3

宋文玲, 袁媛. 2017. 强厄尔尼诺背景下 2015/2016 年冬季气候预测的不确定性分析 [J]. 气象, 43(10): 1249−1258. Song W L, Yuan Y. 2017. Uncertainty analysis of climate prediction for the 2015/2016 winter under the background of super El Niño event [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 43(10): 1249−1258. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.10.009

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

孙诚, 李建平. 2012. 2009/2010 年北半球冬季异常低温分析 [J]. 气候与环境研究, 17(3): 259−273. Sun C, Li J P. 2012. Analysis of anomalously low surface air temperature in the Northern Hemisphere during 2009/2010 winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(3): 259−273. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10070

Takens F. 1981. Detecting strange attractors in turbulence [M]//Rand D, Young L S. Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 366−381. doi:10.1007/BFb0091924

Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. Geophys. Res. Lett., 25(9): 1297−1300. doi:10.1029/98GL00950

Thompson D W J, Lee S, Baldwin M P. 2003. Atmospheric processes governing the Northern Hemisphere annular mode/North Atlantic oscillation [M]//Hurrell J W, Kushnir Y, Ottersen G, et al. The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. Washington, DC: American Geophysical Union, 81−112. doi:10.1029/134GM05

Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79(1): 61−78. doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2

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]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112(11): 3253−3256. doi:10.1073/pnas.1420291112

吴正贤, 李崇银, 陈彪, 等. 1990. 1982~1983 年冬季厄尔尼诺期间大气环流异常的诊断分析 [J]. 热带气象, 6(3): 253−264. Wu Z X, Li C Y, Chen B, et al. 1990. A diagnostic analysis of general circultaion anomaly during the El Niño process for the winter 1982/83 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 6(3): 253−264. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.1990.03.008

Ye H, Beamish R J, Glaser S M, et al. 2015. Equation-free mechanistic ecosystem forecasting using empirical dynamic modeling [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112(13): E1569−E1576. doi:10.1073/pnas.1417063112

袁俊鹏, 曹杰. 2013. 北半球环状模周期变化和突变研究 [J]. 地球物理学报, 56(2): 409−421. Yuan J P, Cao J. 2013. Research on the northern annular mode cycle variation and mutation [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 56(2): 409−421. doi:10.6038/cjg20130205

张琼, 胡永云. 2015. 平流层 NAM 异常事件与东北亚地面温度的关系 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 51(5): 829−836. Zhang Q, Hu Y Y. 2015. Relationship of stratospheric circulation anomalies with surface temperatures over northeast Asia [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 51(5): 829−836. doi:10.13209/j.0479-8023.2015.009

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): 3175−3182. doi:10.1007/s00382-018-4317-x

周一博, 方明强. 2018. 对厄尔尼诺事件分类结果不一致原因的初步分析 [J]. 中国海洋大学学报, 48(8): 152−162. Zhou Y B, Fang M Q. 2018. A preliminary study of the uncertainties of the El Niño classification [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 48(8): 152−162. doi:10.16441/j.cnki.hdxb.20160033

朱乾根, 葛旭阳, 矫梅燕. 1998. 1976−1977 年及 1982−1983 年厄尔尼诺事件过程差异的年代际背景 [J]. 气象科学, 18(3): 203−213. Zhu Q G, Ge X Y, Jiao M Y. 1998. Difference of interdecadal background between 1976/77 and 1982/83 El Niño events [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 18(3): 203−213.