王瑜, 钱忠华, 颜鹏程, 等. 2020. 非自然因素引起的增温趋势的时空分布特征 [J]. 大气科学, 44(3): 565−574. WANG Yu, QIAN Zhonghua, YAN Pengcheng, et al. 2020. Temporal and Spatial Distribution Characteristics of an Increasing Temperature Trend Caused by Unnatural Factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(3): 565−574. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1906.19106

非自然因素引起的增温趋势的时空分布特征

王瑜[1, 2] 钱忠华[3] 颜鹏程[4] 封国林[1, 2, 3]

1 兰州大学 大气科学学院，兰州 730000
2 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室，北京 100081
3 扬州大学物理科学与技术学院，扬州 225002
4 中国气象局兰州干旱气象研究所甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室，兰州 730000

摘 要 基于数据长程相关性，利用相对变化趋势，构建气温相对变化趋势的概率密度函数及超越概率，研究并计算了 1951～2017 年中国气温相对变化趋势基于一定置信水平下属于自然变率范畴的置信限，判别相对变化趋势是否由非自然因素引起（增温是否显著），探讨不同地区非自然因素引起的温度变化的阈值、相应的转折时间段及演变趋势。结果表明：（1）中国 160 站温度资料中有 10% 的站点趋势显著性被传统线性回归方法高估了，这些站点主要位于西北、西南和东部沿海地区。（2）从全国温度趋势的空间分布来看，除新疆中西部地区呈现降温趋势之外，其他地区均为增温趋势，其中东北、内蒙及晋北地区非自然趋势大，增温显著。（3）从不同年代际增温显著区域的空间演变来看，华北、东北地区率先增温显著，之后逐渐向南向西扩展，1966~2001 年时段中国大部分区域表现为非自然增温显著；1971~2006 年时段，东北地区以及内蒙东北部增温显著区域开始逐渐减少，同时中国西南地区增温显著区域开始逐渐增多；1976~2011 年增温显著区域最大；1981~2016 年，增温显著站点主要集中在黄河、长江流域及两大流域之间和中国南方地区。综上，中国非自然因素引起的增温显著区域在时间和空间上均存在显著的年代际转折。本研究为中国气温变化的归因及其预测研究，为加强气候变化研究成果向短期气候预测的转化及联系提供新视角、新途径。

关键词 非自然因素 趋势 地表气温 增温显著
文章编号 1006-9895(2020)03-0565-10 **中图分类号** P467 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1906.19106

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of an Increasing Temperature Trend Caused by Unnatural Factors

WANG Yu[1, 2], QIAN Zhonghua[3], YAN Pengcheng[4], and FENG Guolin[1, 2, 3]

1 *College of Atmospheric Sciences*, *Lanzhou University*, *Gansu Province*, *Lanzhou* 730000
2 *Laboratory for Climate Studies*, *National Climate Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081
3 *Department of Physical Science and Technology*, *Yangzhou University*, *Yangzhou* 225002
4 *Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province/Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of China Meteorological Administration*, *Institute of Arid Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Lanzhou* 730000

收稿日期 2019-01-12；**网络预出版日期** 2019-07-09
作者简介 王瑜，女，1994 年出生，硕博连读研究生，主要从事非线性方法、气候变化研究。E-mail: wangy2017@lzu.edu.cn
通讯作者 封国林，E-mail: fenggl@cma.gov.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41875096、41530531、41675050、41875083，公益性行业（气象）科研专项 GYHY201506001
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41875096, 41530531, 41675050, 41875083), Key Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201506001)

Abstract In this study, the relative trend in temperature change in China from 1951 to 2017 was used to construct a probability density function and exceedance probability based on long-term correlation of relevant data. The confidence limit of this trend, belonging to natural variability, was studied and calculated under a certain confidence level. We sought to determine whether the relative change trend was caused by unnatural factors (whether the temperature increase was significant), and explore the threshold values of temperature change caused by unnatural factors in different regions, corresponding transition time periods, and evolutionary trends. The results showed that: (1) 10% of the site temperatures at 160 stations were overestimated when using traditional linear regression methods to calculate trend significance. These sites were mainly located in the northwest, southwest and eastern coastal areas of China. (2) From the perspective of spatial distribution of temperature trends in the country, except for the cooling trend in the central and western regions of Xinjiang, the other regions all showed warming trends. Relative temperature changes in Shanxi, Inner Mongolia, parts of Ningxia, southwestern Xinjiang, Yangtze River Delta, and southwestern Yunnan were relatively large. Unnatural trends in Northeast China, Inner Mongolia, and the northern Shanxi Province were large, and the temperature increase was significant. (3) From the spatial evolution of the significant inter-decadal warming areas, the northern and northeastern regions of China took the lead in increasing temperature, a trend that gradually expanded to the south and west. During the period of 1966–2001, most regions in China showed an increase in unnatural factors; for 1971–2006, temperatures in the northeastern and northeastern Inner Mongolia regions began to gradually decrease, while significant warming in southwestern China began to gradually expand. The number of significant warming sites was largest during 1976–2011; from 1981 to 2016, the significant warming sites were mainly concentrated in the Yellow River and Yangtze River Basins in southern China. In summary, there were prominent inter-decadal spatial and temporal transitions in significant warming areas in China caused by unnatural factors. This paper may provide new perspectives and new ways for the attribution and prediction of temperature change in China, and strengthen the linkage of climate change research and short-term climate prediction.

Keywords Unnatural factors, Trend, Surface air temperature, Significant temperature increase

1 引言

工业革命以来，人类活动导致二氧化碳排放量剧增，更多的热量被截留在大气层内，造成全球气温显著升高，并进一步引起地表冰雪融化、冻土消融、海平面上升等气候变化事件（IPCC, 2007,2013；苏京志等，2016）。全球气候变化不仅会引起地球自然生态系统发生改变，还会威胁人类的生存。国际社会关注全球变暖，并正积极采取措施共同应对气候变化。

尽管全球增暖是一个不争的事实，但进入 21 世纪以来，全球气温的增温趋势显著下降，呈现减缓的特征。丁一汇和马晓青（2007）的研究发现 2004～2005 年中国冬季平均温度显著低于历史平均值。之后 Kaufmann et al（2011）研究也指出 1999～2008 年北半球热带以外陆地地表温度趋势与同期全球地表年平均温度的线性增长趋势相比，存在着由增暖转变为近十年几近中性甚至变冷的系统性减弱现象，这引起北半球中高纬地区冬季异常低温频发。导致近几十年全球变暖减缓的原因，有学者将之归结于外强迫因子的变化，人类活动增加了对流层和平流层的气溶胶，通过散射和吸收太阳短波辐射，引起增暖减缓（Solomon S et al., 2010; Solomon A et al., 2011）；也有学者认为这可能是由气候系统自身的自然变率引起，如一些研究（Kosaka and Xie, 2013; Tollefson, 2014）就提出低纬度东风风速增加引起赤道表层暖海水向西移动，从而将更多的热量存储在海洋深处，引起赤道中东太平洋海水温度降低，并引起全球增暖减缓。那么，造成全球温度长期趋势变化的主要原因到底是人类活动，还是气候系统本身的自然变率？这是科学工作者面临的一个重要科学问题。

大气系统是一个外有强迫、内有耗散的非线性系统，全球温度的长期趋势变化或与气候系统自身的变率、人类活动均存在一定的关联，传统研究气象要素长期的趋势变化通常采用线性回归方法，该方法利用气象要素与时间的线性关系，得到的长期趋势是包含系统内部自然趋势和外部非自然趋势的。由于非自然因素的影响可能投射到自然因素的影响中或与自然变率相结合，所以有必要区分气候变化中的自然变率与非自然强迫部分。目前尚无合适和成功的方法定量区分气候变化中人类活动等非自然

因素造成的外部趋势和由大气圈、水圈、太阳辐射等自然因素引起的系统内部趋势及两者各自的影响。有学者从非线性角度（江田汉和邓莲堂, 2005; Rybski et al., 2006, 2008; 封国林等, 2009; 何文平等, 2009）开展了一些探索性研究，发现长时间的气候数据往往具有一定的长程相关性，长程相关性表征系统自身的自然波动，亦即内部变率。Peng et al.（1994）提出的去趋势波动分析方法（Detrended Fluctuation Analysis, DFA），适用于时间序列的长程幂律相关分析，能够有效的分析出系统自身的长程相关性。李文菁（2016）考虑长程相关性对序列变化趋势的影响，利用 DFA 方法研究了中国 590 个气象观测站从 1960 年 1 月 1 日至 2005 年 12 月 31 日近 46 年的日最高气温的日值序列的气温趋势，结果表明超过 94% 的站点长程相关性所引起的内部趋势是显著的，气候系统的内在波动带来的影响是不容忽视的。因此，有必要研究气候序列的长期趋势中哪些是自然因素主导的，哪些是非自然因素主导的，并基于此进行相应的归因与预测研究，采取对应的有效措施。

而定量描述气候系统的自然变率与非自然变率一直是气象工作者热衷的研究课题。Hasselmann（1993）提出一种定量化鉴别“人为气候强迫信号”并作归因分析的方法——最佳指纹方法，丁裕国（2002）等利用耦合气候模式研究并发现 20 世纪的增暖超出了自然变率影响的范围，指出至少有部分因素来自于包括人类活动在内的外部强迫。法国布雷斯特大学的 Sèvellecand Drijfhout（2018）开发了一种基于变换算子的统计方法来描述系统的自然变率，该方法可以解释系统混沌行为并可提供可靠的全球平均表面气温和海面温度的概率预测，对 2018～2022 年的预测表明，由自然变率导致的气候变暖将暂时强化长期的全球变暖趋势，增加了极端温度出现的可能性。那么能否定量分析出气象要素趋势变化中非自然变率的显著性及其对长期趋势变化的影响？Lennartz and Bunde（2009，2011）定义了基于各时间序列自身波动程度上标准化描述趋势增长量的相对趋势，利用数据的长程相关性，针对各地区温度演变特征确立不同的判别标准来对温度相对变化趋势进行显著性检测，可一定程度上改善传统检测方法使用统一的判别标准易导致趋势显著性估计不准确的问题；同时基于一定置信水平下的自然变率置信限与相对变化趋势的数值大小关系，可以定量识别非自然因素影响程度，为客观判别温度变化趋势是否为非自然因素所引起提供一种新的有效方法。Becker et al.（2014）通过该方法研究了潮汐的进退，结果表明在全球和区域范围内观察到的海平面变化已经超出了自然变率的影响范围，即人类活动引起了海平面高度的增加。随后，Yuan et al.（2015）以南极的岛屿、海岸线、大陆地区 12 个台站的观测温度记录为研究对象，同样通过该方法计算考虑长程相关的趋势显著性，并进一步与自回归方法得到的结果进行比较，发现南极大多数台站过去几十年的趋势并不显著，并指出长程相关性对趋势评估的影响是不可忽视的，通过考虑长程相关性的影响确定更为严格的判别标准，可以获得更为准确的趋势评估。Tamazian et al.（2015）在 Lennartz and Bunde（2011）的基础上将此部分工作进行了拓展，将表征长程相关性的波动指数α适用于此方法的上限由 1.1 提升至 1.5，同时证明该方法也适用于非高斯的、偏态的数据分布，并给出趋势显著性的可行表达式，应用于估计南极中西部的增暖。

因此，本文在 Tamazian et al. (2015)、Lennartz and Bunde（2011）等人的研究基础上，基于气候系统的长程相关性，利用无量纲的温度相对变化趋势，研究了 1951～2017 年中国地区更为科学准确的气温趋势变化情况；构建中国各测站温度相对变化趋势的概率密度函数及超越概率，计算气温相对变化趋势基于一定置信概率下属于自然变率范畴的置信限，定量判别各地区气温相对变化趋势是否由非自然因素引起，识别非自然因素影响程度（增温是否显著），探讨中国不同地区非自然因素引起的温度变化的阈值、相应的转折时间段及演变趋势。同时针对传统线性回归方法没有考虑长程相关性的问题，定量区分相对变化趋势的自然波动与非自然变率部分，旨在提高气温相对变化趋势显著性检测的准确率并基于此开展相应的归因与预测研究，有效采取相应的应对措施。

2　数据和方法

2.1　数据说明

本文采用的数据是由中国气象局国家气候中心（http://cmdp.ncccma.net/nccdownload/index.php?ChannelID=1[2018-12-01]）发布的中国 160 个气象台站 1951 年 1 月至 2017 年 6 月的月平均温度资料。

考虑到温度资料的季节性趋势特征，本文使用该温度数据的距平序列（每月减去该月 66 年的平均值）进行研究。

2.2 研究方法

本文所用方法参考自 Lennartz and Bunde（2011）的研究，为简便起见，以黑龙江呼玛站为例（图 1）来示意所关注的物理量。首先利用线性回归方法获得距平序列趋势的增长量 Δ（表示为线性斜率与序列长度的乘积），进而定义相对变化趋势为 $x=\Delta/\sigma$，其中 σ 为观测数据围绕线性回归线的标准差。值得注意的是，传统的标准差表现的是观测数据相对于平均值的偏离程度，本文所用方法定义的标准差 σ 则是相对于变化趋势的偏离程度，反映了序列自身的波动大小，更多地保留了序列自身的信息。因此本文中研究的相对变化趋势 $x=\Delta/\sigma$ 是考虑了变化趋势以及相对于变化趋势的波动程度的物理量，用标准化的无量纲方式描述了基于单位波动程度上的趋势增长量。与传统线性趋势相比，该相对趋势能够更准确、真实地反映各地区趋势变化情况及区域间的差异性，更具有鲜明的物理含义及可对比性。波动指数 α 描述序列的记忆性。

为了检测相对趋势中的非自然因素所引起的趋势变化（以下简称非自然趋势），首先要研究温度时间序列的内部波动即长期记忆性，这里使用概率统计中目前使用比较广泛的可去除资料局部线性趋势的 DFA 分析法，获得表征时间序列长程相关特征的波动指数 α。

于是给定一条时间序列，可由以下 3 个物理量描述：（1）长度 L，（2）相对变化趋势 $x=\Delta/\sigma$，（3）由二阶 DFA 获得的波动指数 α。为了估计非自然趋势对观测的相对变化趋势的贡献，给定一个由 α 描述的长度 L 的长程相关记录，则需要知道一个介于 x 至 $x+\Delta x$ 的相对趋势发生的概率，并认为在一定的置信水平内为自然变率。

构建基于相对变化趋势 x 和波动指数 α 的概率密度函数。设 $P(x, \alpha; L)$ 为观测资料的相对变化趋势概率密度函数，相对于 x 呈对称分布，L 为资料的长度。

据概率密度函数 $P(x, \alpha; L)$（介于 x 至 $x+\Delta x$ 的相对趋势发生的概率）可得到相对变化趋势大于 x 的超越概率函数：

$$W(x,\alpha;L)=\int_x^{\infty}P(x',\alpha;L)dx'. \qquad (1)$$

那么对于某一置信区间 $[-x_Q, x_Q]$ 所对应的置信水平 Q 为

$$Q=\int_{-x_Q}^{x_Q}P(x',\alpha;L)dx'=1-2W(x,\alpha;L), \qquad (2)$$

因而可由超越概率的反函数得到自然变率置信限 x_Q：

$$x_Q=W^{-1}[(1-Q)/2,\alpha;L], \qquad (3)$$

设 Q=0.95 的置信概率内为自然变化，当 $x>x_{95}$，表示 x 所表示的相对变化趋势超过了其 95% 的增长水平，此时 x 的变化已经超出了自然变率的范畴，因此为非自然趋势所造成的异常变化。经进一步推导（Lennartz and Bunde, 2011）得 x_Q 具体求算公式

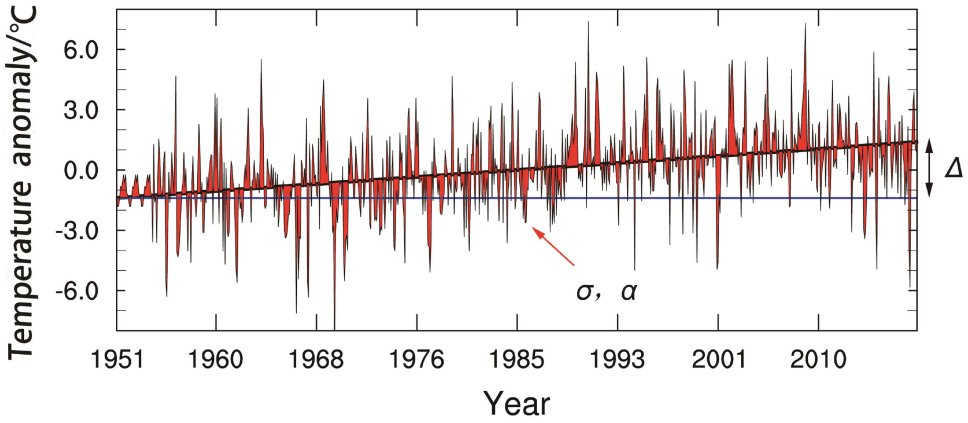

图 1 黑龙江呼玛站 1951 年 1 月至 2017 年 6 月温度距平序列（黑色折线）。黑色斜线是温度距平序列的线性回归线，蓝色水平线表示趋势变化的参考水平，红色阴影是温度距平序列与其回归线的差值

Fig. 1 Temperature anomaly sequence at the Huma station in Heilongjiang Province from January 1951 to June 2017(black polyline). The black slash is the linear regression line of the temperature anomaly series, the blue line indicates the reference level of trend change, and the red shadow is the difference between the temperature anomaly sequence and its regression line

如下：

$$x_Q(\alpha,L)=C_L\alpha^{\delta_L}\left\{\frac{\omega_L^2}{2}+\ln\left(\frac{2}{1-Q}\right)-\ln\left[\mathrm{erf}\left(\omega_L/\sqrt{2}\right)\left(\sqrt{2\pi}\omega_L\right)+2\mathrm{e}^{-\omega_L^2/2}\right]\right\},\quad(4)$$

其中，erf 为误差函数，在误差范围内，ω_L^2可以近似为$\omega_L^2=-6.32+1.41\ln(L)$，$C_L\approx 2.04-0.2\ln(L)$，$\delta_L\approx -0.57+0.61\ln(L)$。

至此，可构建不同波动指数 α 和数据长度 L 所对应的概率密度函数和超越概率，并由公式（4）获得不同置信水平 Q 下是否为由非自然因素引起的相对变化趋势（非自然趋势）的判别临界值 x_Q，此处提出的方法的优势在于可以一个简单的（准分析）方法定量获得任何置信水平 Q 的自然变率区间 $[-x_Q, x_Q]$。通常我们选取 Q=0.95 的置信水平，通过比较 $[-x_{95}, x_{95}]$ 与测算的相对趋势 $x=\Delta/\sigma$，可以判定相对趋势是否非自然因素影响显著。若 x 在置信区间 $[-x_{95}, x_{95}]$ 外，则相对趋势由非自然因素引起，且趋势变化显著，同时 $x-x_{95}$ 定义为最小非自然趋势，$x+x_{95}$ 定义为最大非自然趋势，进而得到非自然趋势（人为影响）所引起的温度变化的阈值 $[\Delta_{\min}, \Delta_{\max}]$，$\Delta_{\min}=\sigma(x-x_{95})$ 即最小非自然趋势 $x-x_{95}$ 所引起的温度变化量，当测算的相对趋势为升温趋势时（即 $x>0$），$\Delta_{\min}$ 为正值（即 $x>x_{95}$, $x_{95}>0$）则表示非自然因素影响显著，值越大非自然趋势升温越显著；同理，当测得的相对趋势为降温趋势时（即 $x<0$），$\Delta_{\min}$ 为负值 (即 $x<x_{95}$, $x_{95}<0$) 则表明非自然因素影响显著，值越小非自然趋势降温越显著。$\Delta_{\max}=\sigma(x+x_{95})$ 即最大非自然趋势 $x+x_{95}$ 所引起的温度变化量，即在对应时间段内温度变化量的最大幅度；若 x 在置信区间 $[-x_{95}, x_{95}]$ 内，则相对趋势在自然变率的范畴，非自然因素影响不显著。因此，该方法不仅可判别各地区气温相对变化趋势是否由非自然因素引起（即增温是否显著），还可定量识别非自然因素影响程度，及非自然因素引起的温度变化的阈值，为相应的归因与预测研究提供了新思路。

3　非自然趋势的检测及其时空分布特征

3.1　典型站点分析

由于传统检验趋势显著性的方法没有考虑长程相关性的存在，会影响趋势显著性的评估，且 Tamazian et al.（2015）也指出传统线性回归方法对趋势显著性的估计（已在 IPCC 报告中使用）对于长程相关气候记录是一个较好的近似，但通常会高估显著性。于是首先考察本方法与传统方法对于趋势显著性检测结果的差异，如图 2 是福建厦门站近 66 年来逐月温度距平序列（蓝色线所示），红色直线为传统回归方法计算得到的线性趋势情况，趋势达到 0.06°C $(10a)^{-1}$，通过了置信水平为 95% 的显著性检验。利用本文方法计算其围绕回归线的标准差 σ = 1.027，线性趋势的增长量 Δ=0.3830，进而可得到相对变化趋势 x = 0.3729，根据 2.2 节中方法可以得到 95% 置信水平下自然变率的置信限 x_{95} = 0.5501，故而 $x<x_{95}$，即认为该序列的趋势

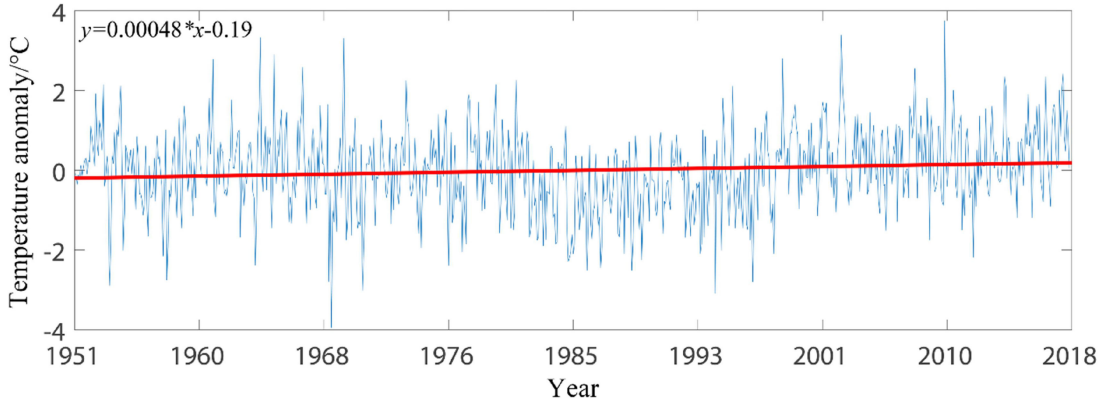

图 2　福建厦门站 1951 年 1 月至 2017 年 6 月（798 个月）温度距平序列，蓝色折线表示温度距平序列，红色直线表示其线性回归线

Fig. 2　Temperature anomaly sequence at Xiamen station in Fujian Province from January 1951 to June 2017 (798 months). The blue line represents the temperature anomaly sequence, and the red line is the linear regression line of the temperature anomaly series

不显著，这意味着该站的温度长期变化趋势属于自然变率的范畴内，而传统的线性趋势检测方法对该站点温度趋势显然高估了。

进一步对全国 160 个站点进行趋势显著性检验并与传统方法的结果对比，以研究趋势显著性估计情况（图 3）。统计表明，在相同的置信水平下，有 10% 的站点趋势显著性被传统方法高估了，高估站点主要位于中国西北、西南及东部沿海部分地区。因此，本文方法由于区分了系统的自然变率与非自然影响部分，可更真实地反映趋势变化情况，更准确地评估趋势显著性。

3.2 温度相对变化趋势及其非自然趋势变化量的空间分布

3.2.1 温度相对变化趋势的空间分布

考虑到本文方法定义的相对变化趋势能更准确地反映趋势变化情况，于是接下来考察温度相对趋势的空间分布（图 4）以进一步了解全国温度变化情况。总体来看，除新疆天山山脉中南部地区为降温趋势之外，其他地方均为升温趋势。其中，山西北部、内蒙中部、宁夏中部、新疆西南部、长江三角洲地区、青藏高原以及云南西南部地区温度相对变化趋势较大，阈值范围在 1.6～2.4 之间，而青藏高原与云南西南部地区温度相对变化趋势最大，达到 2.0 以上；四川、重庆、贵州、广西等省份及新疆中西部地区温度相对变化趋势较小，阈值范围在 0.2～0.4 之间，其中新疆天山山脉中南部地区最小，小于 0，即该区域温度序列呈现降温趋势。可见，基于各地区自身波动程度上标准化描述趋势增长量的相对大小的温度相对趋势具有明显的区域特征，能更真实准确地反映不同地区趋势变化的大小情况。

3.2.2 自然变率空间分布

为了理清全国站点的温度序列中哪些趋势受非自然因素影响显著，就要对相对趋势进行非自然趋势检测或显著性判别，那么就需要先确定各站点自然变率的范围，其空间分布情况如图 5，除青藏高原大地形外，呈现明显的带状结构，30°N～45°N 区域的自然变率阈值明显高于大于 45°N 的高纬度和小于 30°N 的低纬度区域。其中大值区域主要位于北京、天津、河北、江苏组成的沿海区域以及河套地区，阈值范围在 0.9～1.2 之间，最大值主要位于北京、天津地区（1.1～1.2）。青藏高原、长江以南地区的大部分省份、东北大部地区自然变率置信限较小，阈值范围在 0.1～0.4 之间，其中最小值位于湖南、江西地区，低于 0.2。总体来说，自然变率的空间分布存在较大的地域差异，这进一步说

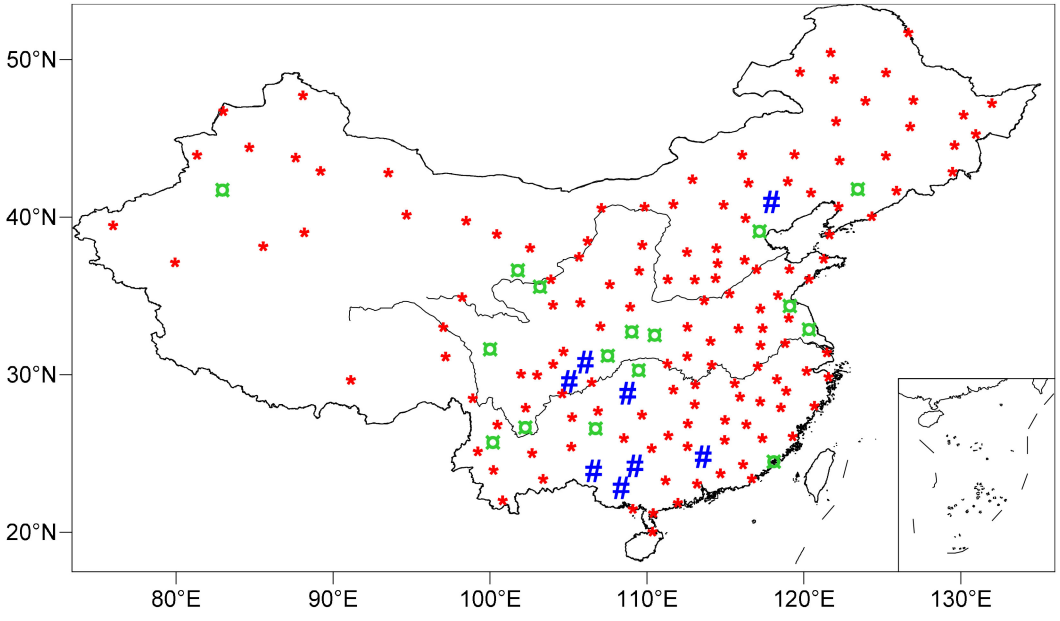

图 3 1951 年 1 月至 2017 年 6 月我国 160 个站点月平均温度趋势变化的显著性检验结果比较。红（蓝）色站点表示两种方法检验结果均（不）显著；绿色站点表示传统方法显著，本方法检验结果不显著

Fig. 3 Comparison of monthly average temperature trend significance test results for 160 stations in China from January 1951 to June 2017. The red (blue) color station indicates that the test results of both methods were (not) significant; the green site indicates that the traditional method was significant, and the test results of this method were not significant

明传统检测方法使用统一的判别标准更容易导致趋势显著性估计不准确。本文所用方法对各地区温度变化趋势的显著性检测是基于各地区温度演变特征建立不同的判定临界值来进行的，因此能够一定程

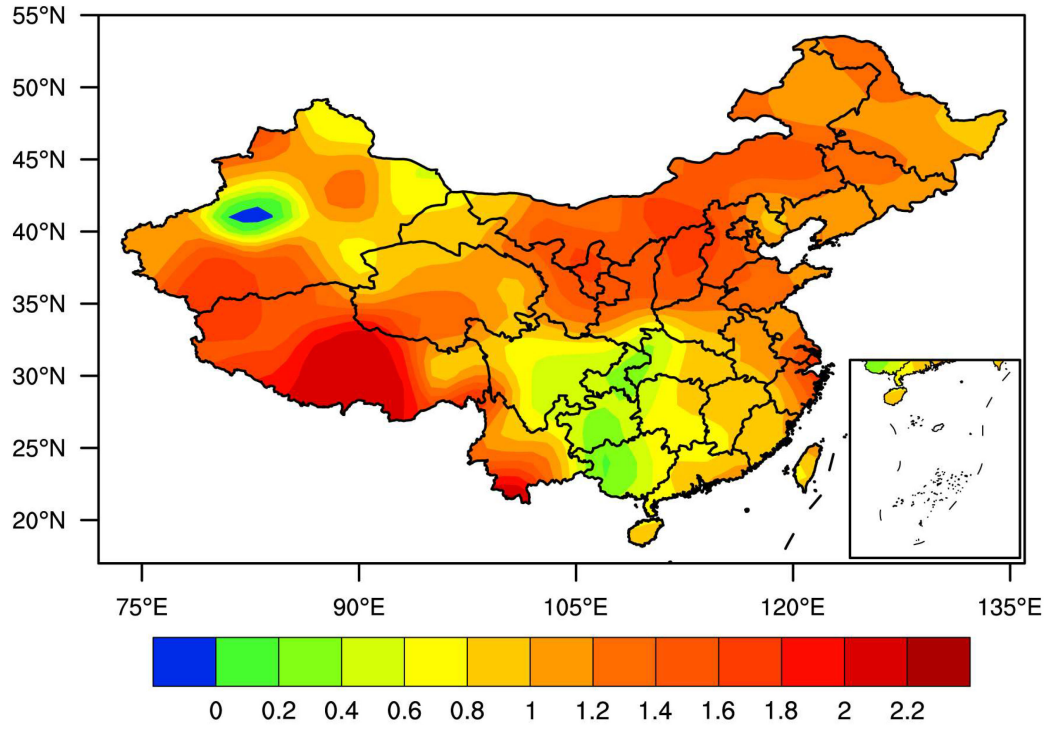

图 4　1951 年 1 月至 2017 年 6 月中国 160 站点温度相对趋势的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of relative temperature trends for 160 stations in China from Jan 1951 to Jun 2017

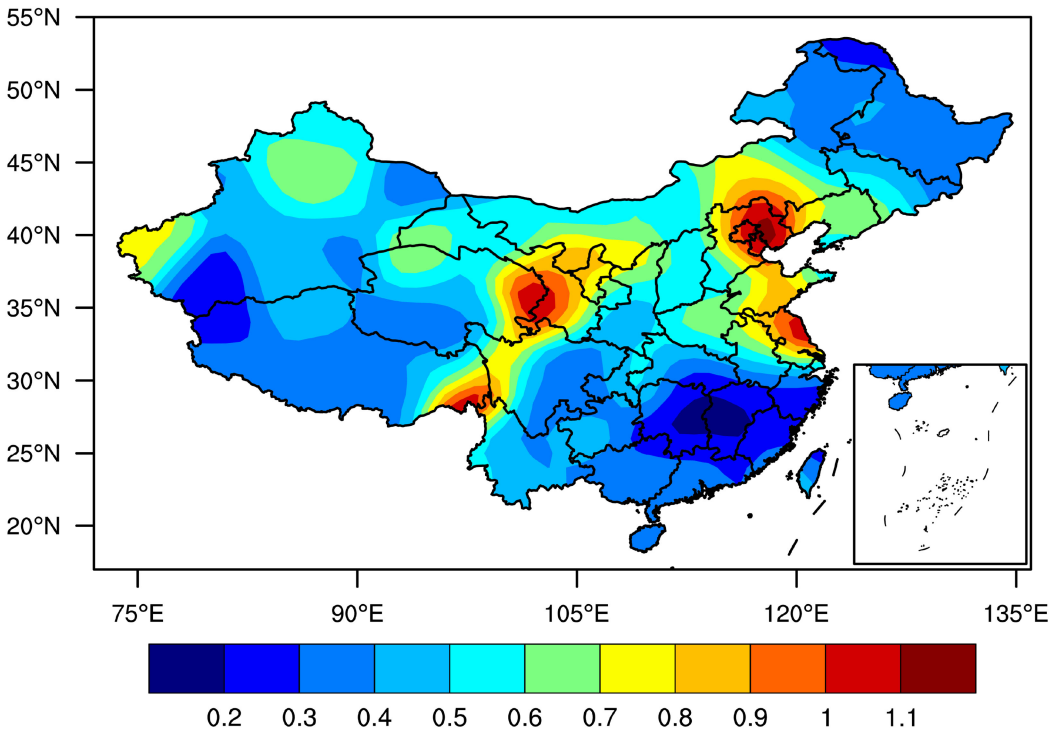

图 5　1951 年 1 月至 2017 年 6 月中国 160 站自然变率空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of natural variability for 160 stations in China from Jan 1951 to Jun 2017

度上分离由于序列自身的自然变率引起的趋势而仅仅检测到非自然因素引起的趋势变化情况。

3.2.3 最小、最大非自然趋势变化量空间分布

进一步考察非自然趋势所引起的温度变化阈值的空间分布情况（图 6）。图 6a 是最小非自然趋势引起温度变化量的空间分布，图中大于 0（即 $x>x_{95}$）的区域相对变化趋势均显著，其中黑龙江、吉林、内蒙中西部、山西北部及青藏高原西部地区最小非自然趋势增长量较大、增温最显著，近 66 年来非自然因素引起的增温幅度至少约 1.2°C～2.4°C；而新疆天山山脉中南部、北京、天津、河北以及西南地区（包括重庆、贵州、广西）的最小非自然趋势变化量为负值，即 x 在区间 $[-x_{95}, x_{95}]$ 内，温度相对变化趋势较小，在自然变率的范畴内，因此非自然趋势不显著。图 6b 是最大非自然趋势引起温度变化量的空间分布，呈现全区一致为正型，华北、东北大部，陕北、宁夏、甘肃中东部以及新疆北部地区最大非自然趋势引起温度变化量较大，阈值范围超过 3.2°C，再次证明东北、内蒙及山西北部地区增温趋势显著。这与 Huang et al.（2017）、Ji et al.（2014）的研究结果相一致，即干旱半干旱区承受更大的增暖风险，增温趋势显著。

3.3 不同年代际非自然趋势的空间分布特征

考虑到二阶 DFA 方法对研究的时间序列的最小长度的限制，对每个站点进行滑动（间隔 5 年）选取 36 年温度序列（包括 1951～1986 年、1956～1991 年、……、1981～2016 年共 7 个时间段），并求各自的波动指数 α、相对趋势 x、置信限 x_{95}，进行非自然趋势检测，判别各时间段的趋势显著性，即找中国站点气温相对变化趋势显著与不显著的临界点（转折的时间段）。图 7 是各时段站点显著性增温的检测情况，红色点表示对应站点在相应时间段非自然增温趋势显著。在 1951～1986 年，增温显著的主要区域位于华北的两个站点；1956～1991 年，增温趋势显著的区域有所扩张，增至 7 个站点；1961～1996 年，站点进一步扩张至东北、西北东部和西南部分地区，站点数升至 18 个；1966～2001 年、1971～2006 年、1976～2011 年和 1981～2016 年，增温显著的站点突增至 72、81、97、86 个（表 1），空间也由华北逐渐扩张至华北、东北大部分地区以及西北地区、江淮地区，并进一步逐渐向华南演变，在 1976～2011 年增温显著区域达到最大。值得注意的是 1971～2006 年以后东北增温显著区域逐渐减小，华南增温显著区域逐渐

表 1 温度变化趋势显著的站点数多的 4 个时间段显著站点数占比

Table 1 Proportion of significant sites in four time periods for a large number of sites with significant temperature changes

时间段	显著站点数占比
1966～2001年	45%
1971～2006年	51%
1976～2011年	61%
1981～2016年	54%

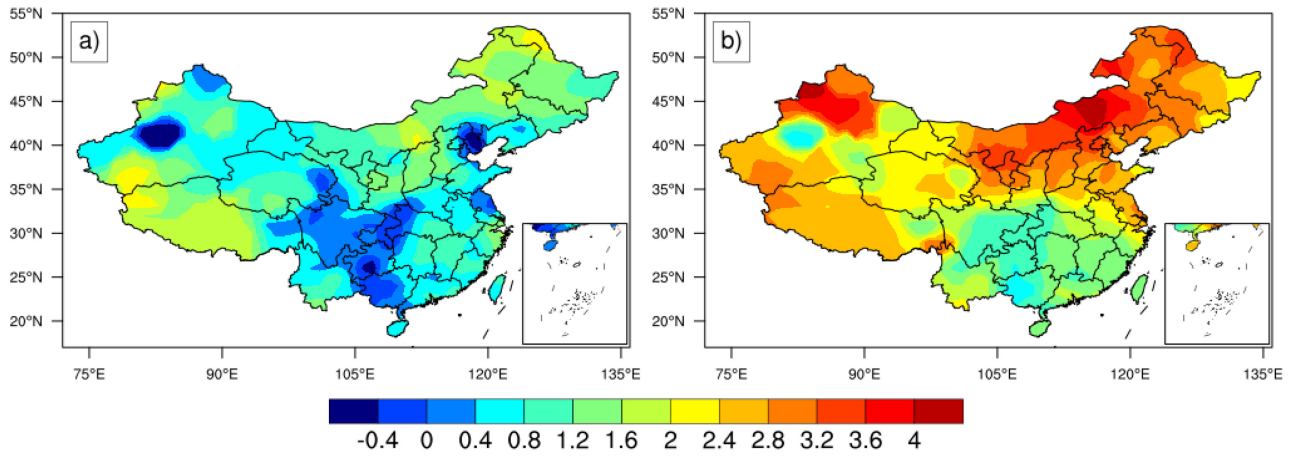

图 6 1951 年 1 月至 2017 年 6 月中国站点温度序列非自然趋势变化量的空间分布情况（单位：°C）：（a）最小非自然趋势变化量Δ_{min}；（b）最大非自然趋势变化量Δ_{max}

Fig. 6 Spatial distribution of unnatural trend variations in temperature series in China from Jan 1951 to Jul 2017 (units: °C): (a) Minimum unnatural trend changeΔ_{min}; (b) maximum unnatural trend change Δ_{max}

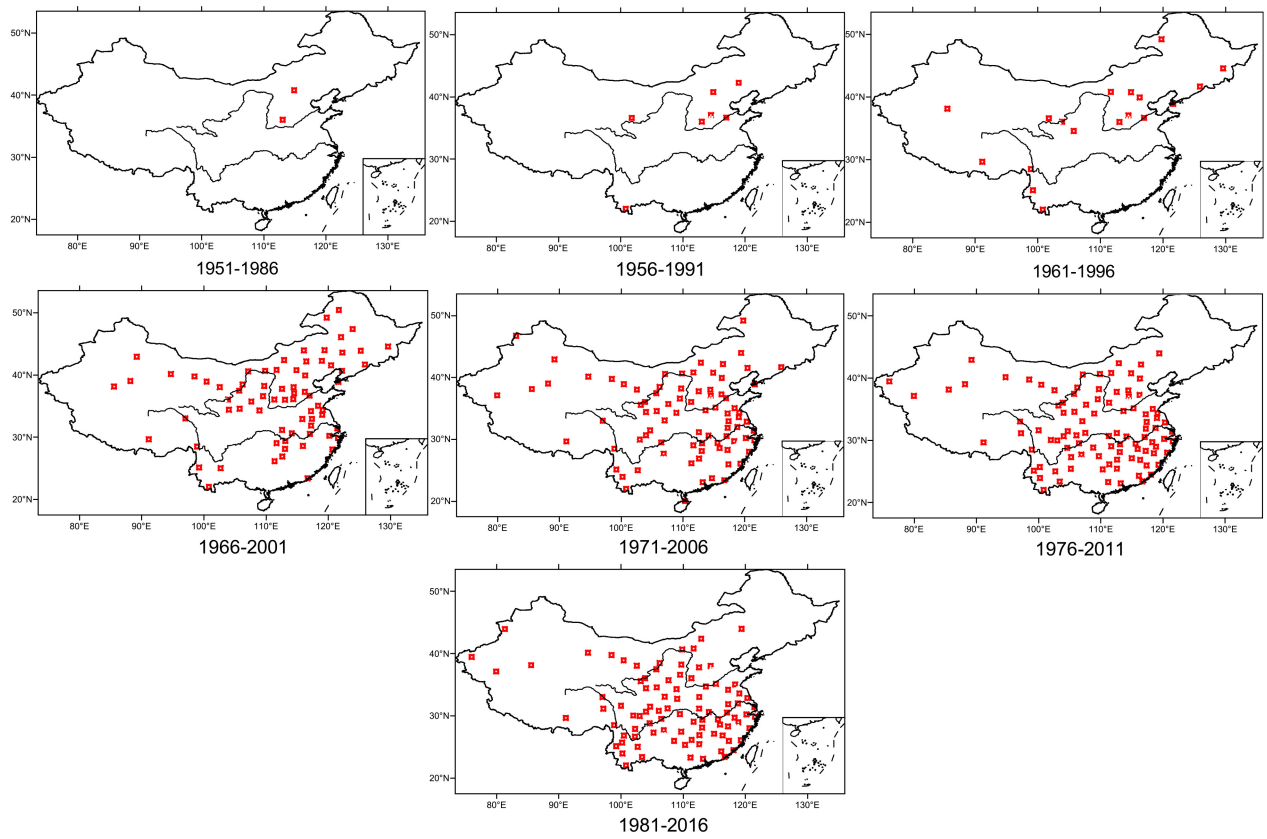

图 7　不同时段增温趋势显著的站点（红点）空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of the sites with significant warming trend (red dot) in different time periods

增多。综上所述，中国非自然因素引起的增温显著区域在时间和空间上均存在显著的年代际转折。

4　结论

本文基于数据长程相关性，利用相对变化趋势，构建气温相对变化趋势的概率密度函数及超越概率，研究气温相对变化趋势基于一定置信水平下属于自然变率的置信限，定量判别相对变化趋势是否由非自然因素引起，即增温是否显著。针对传统线性回归方法没有考虑长程相关性的问题，定量区分相对变化趋势的自然波动与非自然变率部分，旨在提高气温相对变化趋势显著性检测的准确率并量化非自然因素影响程度，探讨不同地区非自然因素影响的演变趋势。为中国气温变化的归因及其预测研究，为加强气候变化研究成果向短期气候预测的转化及联系提供新视角、新途径。主要结论如下：

（1）中国 160 站温度资料中有 10% 的站点趋势在使用传统线性回归方法检测显著性时被高估了，这些站点主要位于西北、西南和东部沿海地区。

（2）从全国温度趋势的空间分布来看，除新疆中西部地区呈现降温趋势之外，其他地区均为增温趋势，其中，山西、内蒙、宁夏部分地区、新疆西南部、长江三角洲地区以及云南西南部地区温度相对变化趋势较大，河北、天津、北京、江苏以及甘肃中南部地区的自然变率的置信限较大，东北、内蒙及晋北地区非自然因素引起的增温趋势大，增温显著。

（3）从不同年代际增温显著区域的空间演变来看，华北、东北地区率先增温，之后逐渐向南向西扩展，1966～2001 时段中国大部分区域表现为非自然因素增温；1971～2006 时段，东北地区以及内蒙东北部增温显著区域开始逐渐减少，同时中国西南地区增温显著区域开始逐渐增多；1976～2011 年增温显著区域最大；1981～2016 年，增温显著站点主要集中在黄河、长江流域及两大流域之间和中国南方地区。综上，中国非自然因素引起的增温显著区域在时间和空间上均存在显著的年代际转折。

参考文献（References）

Becker M, Karpytchev M, Lennartz S S. 2014. Long-term sea level trends: Natural or anthropogenic? [J]. Geophys. Res. Lett., 41(15): 5571−5580. doi:10.1002/2014gl061027

丁一汇, 马晓青. 2007. 2004/2005 年冬季强寒潮事件的等熵位涡分析 [J]. 气象学报, 65(5): 695−707. Ding Yihui, Ma Xiaoqing. 2007. Analysis of isentropic potential vorticity for a strong cold wave in 2004/2005 winter [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65(5): 695−707. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2007.05.005

丁裕国. 2002. 检测人为气候变化信号的“指纹“方法 [J]. 气象教育与科技, 2002(1): 1−3. Ding Y G. 2002. “Fingerprint” method for detecting human-made climate change signals [J]. Meteorological Education and Science and Technology, 2002(1): 1−3.

封国林, 王启光, 侯威, 等. 2009. 气象领域极端事件的长程相关性 [J]. 物理学报, 58(4): 2853−2861. Feng Guoling, Wang Qiguang, Hou Wei, et al. 2009. Long-range correlation of extreme events in meteorological field [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 58(4): 2853−2861. doi:10.3321/j.issn:1000-3290.2009.04.115

Hasselmann K. 1993. Optimal fingerprints for the detection of time-dependent climate change [J]. J. Climate, 6(10): 1957−1971. doi:10.1175/1520-0442(1993)006<1957:offtdo>2.0.co;2

何文平, 吴琼, 张文, 等. 2009. 滑动去趋势波动分析与近似熵在动力学结构突变检测中的性能比较 [J]. 物理学报, 58(4): 2862−2871. He Wenping, Wu Qiong, Zhang Wen, et al. 2009. Comparison of characteristics of moving detrended fluctuation analysis with that of approximate entropy method in detecting abrupt dynamic change [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 58(4): 2862−2871. doi:10.3321/j.issn:1000-3290.2009.04.116

Huang Jianping, Yu Haipeng, Dai Aiguo, et al. 2017. Drylands face potential threat under 2 ℃ global warming target [J]. Nature Climate Change, 7(6): 417−422. doi:10.1038/nclimate3275

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 996pp.

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1535pp.

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

江田汉, 邓莲堂. 2005. 近 140 年中国、北半球和全球气温的标度律 [J]. 高原气象, 24(3): 410−414. Jiang Tianhan, Deng Liantang. 2005. Scaling laws of temperature anomaly over global, Northern Hemisphere, and China in recent 140 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24(3): 410−414. doi:10.1007/s10409-004-0010-x

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

Kaufmann R K, Kauppi H, Mann M L, et al. 2011. Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998-2008 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108(29): 11790−11793. doi:10.1073/pnas.1102467108

李文菁. 2016. 基于去趋势波动分析的中国气温变化趋势研究 [D]. 湘潭大学硕士学位论文, 29. Li W J. 2016. Study of Chinese temperature variation trend based on detrended fluctuation analysis [D]. M. S. thesis (in Chinese), Xiangtan University, 29.

Lennartz S, Bunde A. 2009. Trend evaluation in records with longterm memory: Application to global warming [J]. Geophys. Res. Lett., 36(16): L16706. doi:10.1029/2009gl039516

Lennartz S, Bunde A. 2011. Distribution of natural trends in long-term correlated records: A scaling approach [J]. Phys. Rev. E, 84(2): 021129. doi:10.1103/physreve.84.021129

Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S, et al. 1994. Mosaic organization of DNA nucleotides [J]. Phys. Rev. E, 49(2): 1685−1689. doi:10.1103/physreve.49.1685

Rybski D, Bunde A, Havlin S, et al. 2006. Long-term persistence in climate and the detection problem [J]. Geophys. Res. Lett., 33(6): L06718. doi:10.1029/2005gl025591

Rybski D, Bunde A, von Storch H. 2008. Long-term memory in 1000-year simulated temperature records [J]. J. Geophys. Res., 113(D2): D02106. doi:10.1029/2007jd008568

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 J Z, Wen M, Ding Y H, 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

Solomon S, Rosenlof K H, Portmann R W, et al. 2010. Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming [J]. Science, 327(5970): 1219−1223. doi:10.1126/science.1182488

Solomon A, Goddard L, Kumar A, et al. 2011. Distinguishing the roles of natural and anthropogenically forced decadal climate variability [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 92(2): 141−156. doi:10.1175/2010bams2962.1

Sévellec F, Drijfhout S S. 2018. A novel probabilistic forecast system predicting anomalously warm 2018-2022 reinforcing the long-term global warming trend [J]. Nature Communications, 9: 3024. doi:10.1038/s41467-018-05442-8

Tollefson J. 2014. Climate change: The case of the missing heat [J]. Nature, 505(7483): 276−278. doi:10.1038/505276a

Tamazian A, Ludescher J, Bunde A. 2015. Significance of trends in long-term correlated records [J]. Phys. Rev. E, 91(3): 032806. doi:10.1103/physreve.91.032806

Yuan Naiming, Ding Minghu, Huang Yan, et al. 2015. On the long-term climate memory in the surface air temperature records over Antarctica: A nonnegligible factor for trend evaluation [J]. J. Climate, 28(15): 5922−5934. doi:10.1175/jcli-d-14-00733.1