

Long-Term Correlation and Evolution Law of Temperature in Eastern China in the Past 100 Years

Qiguang Wang¹, Aixia Feng², Yingying Hu³, Wenhai Wang⁴

¹China Meteorological Administration Training Center, Beijing

²National Meteorological Information Center, Beijing

³Chinese Academy of Sciences University, Beijing

⁴Wuyi Second Yellow River Bureau, Jiaozuo Yellow River Bureau, Jiaozuo Henan

Email: wangqg@cma.gov.cn

Received: Jun. 27th, 2019; accepted: Jul. 5th, 2019; published: Jul. 12th, 2019

Abstract

In this paper, we study the 16 stations data set of the “Hundred Years of Uniform Temperatures (V1.0) in the East of China” between 1910.01 and 2015.12 which from the National Meteorological Information Center (NMIC). The temperature data were analyzed and combined with the Detrended Fluctuation Analysis (DFA) to study the long-range correlation of the 100-year temperature series, revealing the memory characteristics and interdecadal evolution of the climate system in the region. Firstly, the paper analyzes and compares the conventional statistic characteristics of 16 centuries-old temperature series in the east, and finds that the trend changes in the temperature series in the past 100 years are generally weakened from northern China to the south. It is caused by the temperature series in the northern region which has steady growth in the past 100 years, but in the South basically it showed a significant warming trend after 1980s. Furthermore, the temperature series scale index of 16 stations in the century is calculated. The results show that the monthly temperature series scale index of each station in eastern China ranges from 0.62 to 0.85, and there are certain long-range correlations. The long-range correlation of the temperature series of stations in the Northeast and middle and lower reaches of Yangtze River is relatively strong, and the long-range correlation in the southern areas is relatively weak. On this basis, the 50-year time window is selected to calculate the temperature series scale index with 10 years as the step size. The study finds that there is a turning point in the long-range correlation of the temperature series of 16 stations in eastern China within 100 years. In the first 70 years (1916 - 1986), the scale index of most stations was relatively stable, but in the 1980s, its long-range correlation was significantly weakened. Until the last 50 years (1976 - 2015), the scale index showed an overall growth trend. The results of this study can provide scientific evidence and support for climate change assessment.

Keywords

Centennial Temperature, Long-Range Correlation, Global Warming

中国东部百年温度长程相关性及其演变规律研究

王启光¹, 冯爱霞², 胡莹莹³, 王文海⁴

¹中国气象局气象干部培训学院, 北京

²国家气象信息中心, 北京

³中国科学院大学, 北京

⁴焦作黄河河务局武陟第二黄河河务局, 河南 焦作

Email: wangqg@cma.gov.cn

收稿日期: 2019年6月27日; 录用日期: 2019年7月5日; 发布日期: 2019年7月12日

摘要

本文针对国家气象信息中心(Chinese National Meteorological Information Center, NMIC)整理的“中国中东部百年均一化气温月值序列(V1.0)”中的中国东部16个站点1916.01~2015.12共100年的月平均气温数据进行分析, 结合去趋势波动分析法(Detrended Fluctuation Analysis, DFA)研究了百年温度序列的长程相关性, 揭示了该地区气候系统的记忆性特征及其年代际演变规律。文中首先分析比较了东部16个百年温度序列的常规统计量特征, 发现近百年月温度序列中呈现的趋势变化, 由中国北部到南方地区总体减弱, 其主要原因在于北方地区近百年月温度序列整体平稳增长, 而南方大部分台站基本是在1980s后才出现显著增温趋势。进一步, 本文计算了16个台站百年尺度的温度序列标度指数, 结果表明中国东部各个台站月温度序列标度指数范围在0.62~0.85之间, 都存在一定长程相关性, 其中东北和长江中下游区域台站温度序列长程相关性较强, 南方地区长程相关性相对较弱。在此基础上, 选取了50年时间窗口以10年为步长滑动计算温度序列标度指数, 研究发现在100年内中国东部16站点的温度序列长程相关性存在转折, 大部分站点的标度指数在前70年(1916~1986年)相对较为稳定, 但是进入1980s, 其长程相关性明显减弱, 直至最近50年(1976~2015), 标度指数又出现整体增长趋势。该项研究结果可以为气候变化检测评估提供科学依据和支撑。

关键词

百年温度, 长程相关性, 全球变暖

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近百年来全球温度经历了以气候增暖为主要特征的变化, 气候变化成为国际上关注的重大问题。我国专家学者亦积极关注中国的气候变化问题以及相关研究。在建立中国区域气温序列的基础上, 对中国的气温变化进行了较为系统的研究分析, 得出中国区域气温变暖趋势显著且高于全球平均水平[1]。Cao *et al.* (2013) [2]基于均一化的气温序列发现中国东部近百年气温增暖速率高达 1.52°C/100a。但在百年尺度上,

无论是全球变暖还是中国气候变暖都存在不确定性[3]。一方面由于台站空间分布不均匀,观测时次和时制不统一,观测仪器变更,站点迁移或城市化引起的观测场环境变化等造成气象资料存在较大的不确定性;另一方面,气候变暖的原因亦存在不确定性,主要是模拟气候变暖的模式存在不确定性、情景设置存在不确定性、气候序列归因分析也存在不确定性。气候时间序列往往是非平稳的并且存在多种时间尺度信息[4][5][6][7]。在包含多种时间尺度信号和模态的时间序列中,仅仅关注其线性特征,显然其分析结果会存在不确定性。为了得到更加客观的结果和结论,需对气候序列的相关特征结构以及非线性特征进行分析。

在气候序列的相关中,既有短程相关亦有长程相关。大量研究表明,大气环流系统要素、气候序列以及极端气候序列存在显著的长程相关性[8][9][10][11][12]。本论文在探讨中国东部百年气温线性变化规律的基础上,研究了中国东部18个百年序列站的单站长程相关性,并且探索了其年代际尺度长程相关性规律,揭示了中国百年气温在不同时空尺度上的相关结构特征,为分析中国东部百年尺度气候特征提供新的方法和思路。

2. 资料和方法

本文使用国家气象信息中心(Chinese National Meteorological Information Center, NMIC)整理的“中国中东部百年均一化气温月值序列(V1.0)”中的中国东部16个站点1916.01~2015.12共100年的月平均气温数据。该数据集1951年以前的数据主要来源于国家气象信息中心在2002年建立的“中国长年代温度、降水数据集”,在2008年建立的“中国24城市长年代气温数据集”,2009年建立的“全国60个重点城市长时间序列气温和降水数据集”,以及中国科学院大气物理研究所在1991年建立的“中华人民共和国的两个长期仪器记录的气候数据库”的气温资料。1951年之后的资料来自于经过严格质量控制的中国地面气象台站观测资料。此外,中国香港与澳门的气温资料分别来自各自网站。该数据集收集整编不同来源的百年尺度器测气温资料,经过资料融合拼接,严格质量控制,综合利用标准序列法、偏最小二乘回归、多元线性回归及梯度距离权重反比法等插补方法进行缺测值插补,在建立中国近百年气温月值序列基础上,挑取1951年之前资料序列超过30年且质量较好的18个气象台站资料进行均一化检验与订正。本文选用的中国东部16个台站的经纬度和资料时长如表1(18站点中贵阳和昆明资料时长相对较短,且处于西南地区);其站点空间分布如图1所示。

Table 1. The location and time of the century-old station in eastern China

表 1. 中国东部百年台站的位置及时长

台站编号	台站名称	经度	纬度	资料时长
45005	香港	114.17	22.29	1884.01~2016.12
45011	澳门	113.53	22.20	1901.01~2016.12
50527	海拉尔	119.75	49.22	1901.01~2016.12
50953	哈尔滨	126.77	45.75	1901.01~2016.12
53463	呼和浩特	111.68	40.82	1915.01~2016.12
53772	太原	112.55	37.78	1916.01~2016.12
54342	沈阳	123.52	41.73	1905.05~2016.12
54511	北京	116.47	39.80	1889.09~2016.12
54527	天津	117.07	39.08	1890.09~2016.12

Continued

54857	青岛	120.33	36.07	1900.01~2016.12
57494	武汉	114.13	30.62	1905.02~2016.12
57679	长沙	113.08	28.20	1911.01~2016.12
58238	南京	118.80	32.00	1905.01~2016.12
58367	徐家汇	121.43	31.20	1873.01~2016.12
58847	福州	119.28	26.08	1905.01~2016.12
59287	广州	113.33	23.17	1912.03~2016.12

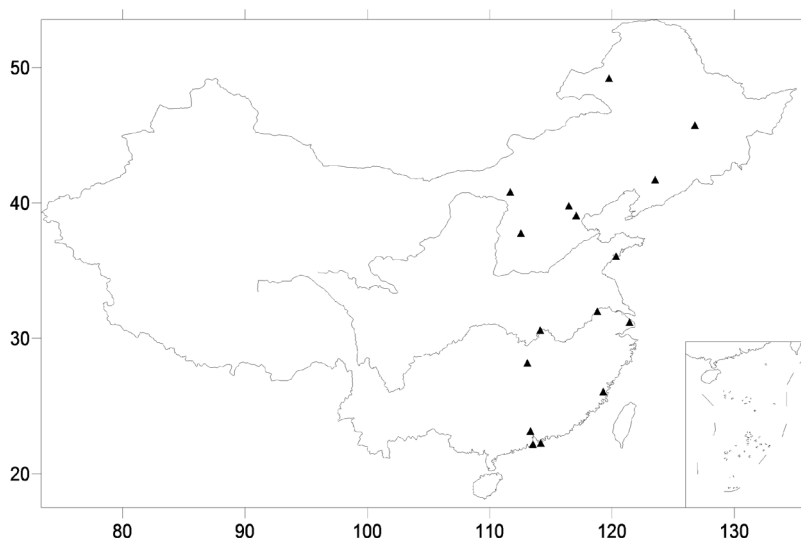


Figure 1. The distribution diagram of 16 site locations
图 1. 16 站点位置分布示意图

去趋势涨落分析方法(detrended fluctuation analysis, DFA)是研究非线性时间序列长程相关性的工具。它可以有效滤去各阶趋势成份,消除其中的伪相关现象,检测非平稳时间序列中的相关性,已广泛应用到自然科学甚至社会科学各个领域[13][14][15]。其计算过程如下:

第一步,计算时间序列($F(s), s$)的累积离差,

$$Y(i) = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \quad (1)$$

其中 $\bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i$ 。

第二步,把 $Y(i)$ 分成 N_s 个不重叠的等间隔 s 的区间 v , 其中 $N_s = N/S$ 。

第三步,对于每个区间 v ,用最小二乘法拟合数据,得到局部趋势。滤去该趋势后的时间序列记为 $Y_s(i)$,表示原序列与拟合值之差,

$$Y_s = Y(i) - P_v(i) \quad (2)$$

其中 $P_v(i)$ 为第 v 区间的拟合多项式。

第四步,计算每个区间滤去趋势后的方差,

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s Y_s^2[(v-1)s+i], (v=1, 2, \dots, N_s) \quad (3)$$

第五步, 对所有等长度区间的方差求均值并开方, 计算标准 DFA 波动函数,

$$F(s) = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{v=1}^{N_s} F^2(v, s)} \quad (4)$$

若时间序列是长程相关, 则 DFA 波动函数 $F(s)$ 与滞后时间 s 成幂律关系

$$F(s) \propto s^\alpha \quad (5)$$

在双对数坐标($F(s), s$)中, 用最小二乘法拟合, 其直线部分的斜率即为标度指数 α 。当 $0 < \alpha < 0.5$ 时, 表示时间序列是非持久的, 只有短期记忆性, 当前事件不会对长期的未来事件产生影响; 当 $\alpha = 0.5$ 时, 表示原序列是白噪声, 例如布朗运动; 当 $0.5 < \alpha < 1.0$ 时, 表示序列具有长程相关特征, 即当前发生的事件和未来事件之间存在长程相关性, 时间序列具有长期记忆性, 且标度指数 α 越大记忆性越好。

3. 中国东部百年温度变化规律分析

为便于分析和比较, 本文选取了自 1916 年 1 月至 2015 年 12 月共 100 年的月平均温度序列进行研究。首先, 对 16 站点的百年温度均值、年际方差及年均值的趋势进行了统计, 如表 2 所示。

Table 2. Centennial mean, variance and trend of temperature in stations in eastern China
表 2. 中国东部台站温度百年均值、方差及趋势

台站名称	经度	纬度	均值(°C)	年际方差	年均值趋势(°C/a)
香港	114.17	22.29	22.65	0.3437	0.0163
澳门	113.53	22.20	22.15	0.5541	0.0163
海拉尔	119.75	49.22	-1.45	1.8858	0.0343
哈尔滨	126.77	45.75	3.80	2.1415	0.0429
呼和浩特	111.68	40.82	6.89	1.1442	0.0150
太原	112.55	37.78	10.62	0.6456	0.0173
沈阳	123.52	41.73	7.31	0.9998	0.0267
北京	116.47	39.80	12.58	0.6434	0.0186
天津	117.07	39.08	13.25	0.4811	0.0375
青岛	120.33	36.07	12.88	0.4823	0.0138
武汉	114.13	30.62	16.50	0.3587	0.0086
长沙	113.08	28.20	18.08	0.2751	-0.0006
南京	118.80	32.00	16.26	0.4689	-0.0021
徐家汇	121.43	31.20	17.32	0.4272	0.0079
福州	119.28	26.08	20.53	0.4412	0.0167
广州	113.33	23.17	22.49	0.4839	0.0181

从表 2 中可以看出 16 站百年温度序列呈现以增温为主要特征的趋势, 但是长沙和南京两站百年温度趋势为负值, 主要是因为该两个站点的温度在 1980s 前主要是降温趋势, 之后虽然增温趋势显著, 但整体上趋势为负, 其中长沙站温度资料演变如图 2(c)所示。本文选择香港、沈阳、长沙、徐家汇四个台站为例, 展示了站点 100 年的年平均温度随时间的变化情况, 从图中可以看出, 香港、沈阳两站在 100 年时间尺度内年平均温度总体呈现上升趋势; 长沙站在 1980s 前温度呈现下降趋势, 1980 年后才明显上升

(图 2(c)); 徐家汇站在 100 年时间内发生了两次较为明显的转折, 一次在 1940s 左右, 另一次出现了 1980s 前后(图 2(d))。从这四个站点的变化情况可知, 不同区域的温度在 100 年时间尺度内变化规律存在显著差异, 近百年的全球增暖需要结合区域特征来分析对气候系统的影响。

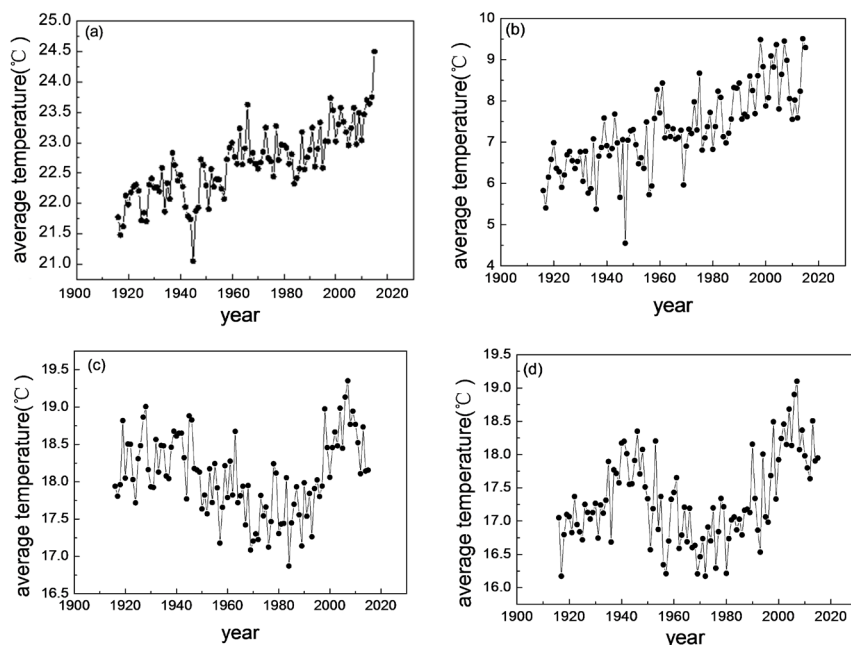


Figure 2. Annual average temperature of 100 years of temperature at different sites: (a) Hong Kong; (b) Shenyang; (c) Changsha; (d) Xujiahui

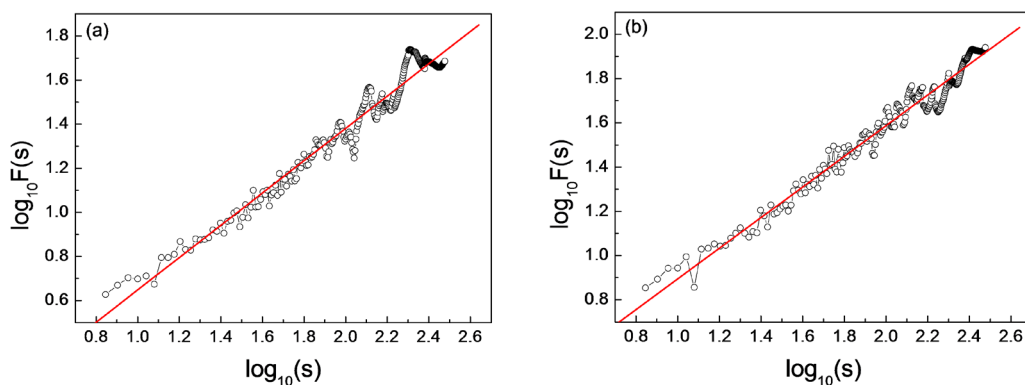
图 2. 不同站点百年温度年均值状况: (a)香港; (b)沈阳; (c)长沙; (d)徐家汇

4. 中国东部温度长程相关性分析

本文首先计算了 16 个台站百年尺度的温度标度指数, 用以分析中国东部各个台站温度百年尺度的长程相关性; 鉴于台站温度变化存在转折的情况, 且绝大多数仅有一次转折, 因此计算了前后 50 年的标度指数以及滑动窗口为 10 年的各个时期 50 年的标度指数, 用以分析各个时期台站温度长程相关性。

4.1. 中国东部百年和 50 年温度序列长程相关性

图 3 所示为香港、沈阳、长沙、徐家汇四个代表站点波动函数幂率分布, 计算得到四个站点月平均温度序列标度指数分布为 0.73、0.69、0.75、0.72, 均表现出一定的长程相关特征。



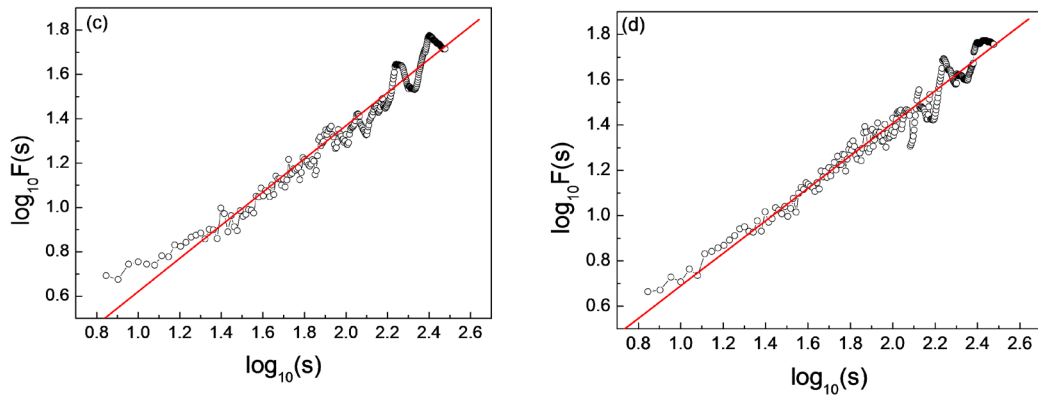


Figure 3. Long-range correlation of monthly temperature-month series of different sites: (a) Hong Kong; (b) Shenyang; (c) Changsha; (d) Xujiahui

图 3. 不同站点百年月温度月值序列长程相关性: (a)香港; (b)沈阳; (c)长沙; (d)徐家汇

4.2. 中国东部百年温度序列长程相关性

进一步计算出全部 16 站点百年温度月均值序列的标度指数, 根据部分站点温度变化的转折, 同时将百年尺度的时间分为前 50 年和后 50 进行了分别计算。结果如表 3 所示。

Table 3. 100-year temperature monthly mean sequence long-range correlation scale index of 16 sites

表 3. 16 站点百年温度月均值序列长程相关标度指数

台站编号	台站名称	α	A (前 50 年)	A (后 50 年)
45005	香港	0.73	0.80	0.62
45011	澳门	0.72	0.82	0.70
50527	海拉尔	0.71	0.76	0.76
50953	哈尔滨	0.76	0.85	0.72
53463	呼和浩特	0.79	0.81	0.69
53772	太原	0.64	0.64	0.72
54342	沈阳	0.69	0.75	0.68
54511	北京	0.67	0.66	0.72
54527	天津	0.76	0.58	0.60
54857	青岛	0.66	0.63	0.71
57494	武汉	0.74	0.61	0.68
57679	长沙	0.75	0.51	0.74
58238	南京	0.85	0.74	0.83
58367	徐家汇	0.72	0.58	0.64
58847	福州	0.62	0.68	0.67
59287	广州	0.77	0.82	0.67

从表中可以看出, 各站标度指数均大于 0.5, 表明都具备长程相关特征, 存在较为明显的可预测性。

4.3. 50年滑动月平均序列 DFA

进一步, 选取了 50 年时间窗口以 10 年为步长进行滑动平均, 计算不同时段各站点标度指数分布, 如图 4 所示。从图中可以发现, 在 100 年时间尺度内, 中国东部 16 站点的温度序列长程相关性存在转折, 具体而言对于大部分站点, 其长程相关性在前 70 年(1916~1986 年)相对较为稳定, 但是进入 1980s, 大部分站点长程相关性明显减弱, 直到最近 10 年标度指数又出现整体增长趋势, 这可能与我国 1980s 初改革开放, 大规模工业化及城市建设有关, 很可能在一定程度上反映了人为因素对区域气候系统状态的影响。此种转折关系在许多站点的温度序列中往往没有反映(如图 5(a)、图 5(b))。

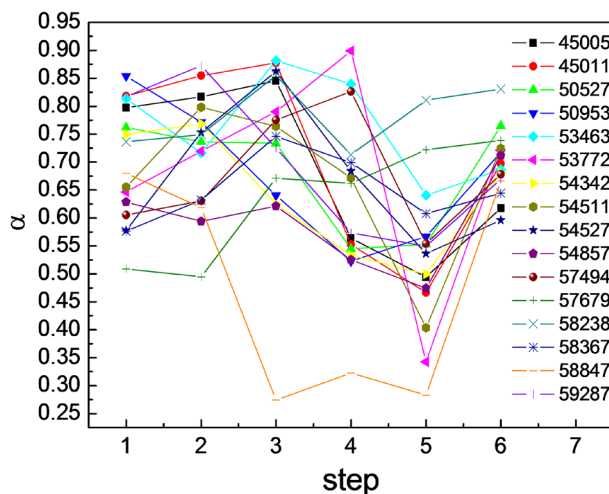


Figure 4. 100-year temperature monthly average sequence 50-year sliding scale index of 16 sites (sliding interval is 10 years)
图 4. 16 站点百年温度月均值序列 50 年滑动标度指数(滑动间隔为 10 年)

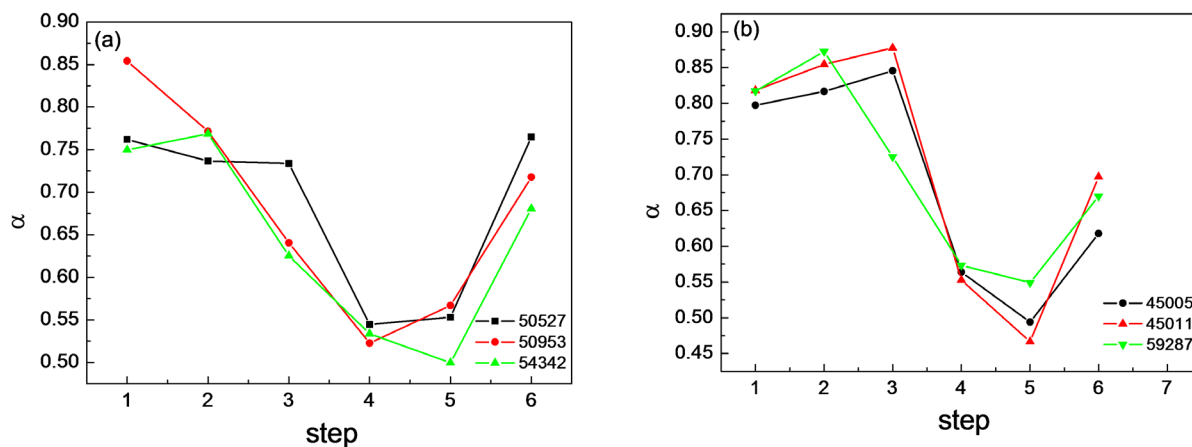


Figure 5. 50-year sliding scale index (sliding interval is 10 years) for a hundred-year temperature-average sequence of different regional sites: (a) 3 sites in northeast China; (b) 3 sites in the pearl river delta region

图 5. 不同区域站点百年温度月均值序列 50 年滑动标度指数(滑动间隔为 10 年): (a)东北地区 3 站点; (b)珠江三角洲地区 3 站点

5. 结论和讨论

本文对中国 16 个具有百年以上温度观测序列的站点的长程相关性进行了对比研究。结果发现, 从区域分布来看, 北方地区站点的长程相关性要弱于南方地区, 从时间分段来看, 前 50 年的长程相关性总体

要比后 50 年弱。进一步计算了 50 年窗口 10 年步长的标度指数演变情况,发现绝大部分站点标度指数呈现先减少后增加的趋势,这反映了中国东部地区百年温度变化具有年代际特征,并且在增暖背景下存在一定的区域变化差异。

基金项目

国家自然科学基金(批准号: 41675107、41775081 和 41530531)资助。

参考文献

- [1] 丁一汇, 王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识[J]. 科学通报, 2016, 61(10): 1029-1041.
- [2] Cao, L., Zhao, P., Yan, Z., *et al.* (2013) Instrumental Temperature Series in Eastern and Central China Back to the 19th Century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**, 8197-8207.
- [3] 赵宗慈, 王绍武, 罗勇, 江滢. 近百年气候变暖的不确定性分析[J]. 科技导报, 2009, 27(923): 41-48.
- [4] 封国林, 曹鸿兴. 自忆预报模式中记忆特性的探讨[J]. 应用气象学报, 1998, 9(2): 219-224.
- [5] Feng, G.L. and Dong, W.J. (2003) Evaluation of the Applicability of a Retrospective Scheme Based on Comparison with Several Difference Schemes. *Chinese Physics*, **12**, 1076-1086. <https://doi.org/10.1088/1009-1963/12/10/307>
- [6] 封国林, 侯威, 董文杰. 基于条件熵长江三角洲温度的非线性动力学特征分析[J]. 物理学报, 2006, 55(2): 962-968.
- [7] 支蓉, 龚志强, 等. 基于幂律尾指数研究中国降水的时空演变特征[J]. 物理学报, 2006, 55(11): 6185-6191.
- [8] Peng, C.K., Buldyrev, S.V., Havlin, S., Simons, M., *et al.* (1994) Mosaic Organization of DNA Nucleotides. *Physical Review E*, **49**, 1685-1689. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.49.1685>
- [9] Arneodo, A., Bacry, E., Graves, P.V. and Muzy, J.F. (1995) Characterizing Long-Range Correlations in DNA Sequences from Wavelet Analysis. *Physical Review Letters*, **74**, 3293-3296. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.3293>
- [10] Shukla, J. (1998) Predictability in the Midst of Chaos: A Scientific Basis for Climate Forecasting. *Science*, **282**, 728-731. <https://doi.org/10.1126/science.282.5389.728>
- [11] Lim, Y.K. and Kim, K.Y. (2007) ENSO Impact on the Space-Time Evolution of the Regional Asian Summer Monsoons. *Journal of Climate*, **20**, 2397-2415. <https://doi.org/10.1175/JCLI4120.1>
- [12] 王启光, 支蓉, 张增平. Lorenz 系统长程相关性的研究[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 5343-5350.
- [13] 王启光, 侯威, 郑志海, 等. 极端事件再现时间长程相关性与群发性研究[J]. 物理学报, 2010, 59(10): 7491-7497.
- [14] Kantelhardt, J.W., Bunde, E.K. and Rego, H.A. (2001) Detecting Long-Range Correlations with Detrended Fluctuation Analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **295**, 441-454. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(01\)00144-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(01)00144-3)
- [15] 王启光, 侯威, 郑志海, 等. 东亚大气长程相关性[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6640-6650.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5711, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/> 顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ccrl@hanspub.org