钱诚, 严中伟, 曹丽娟, 等. 2018. 基于 1873 年以来器测气温的二十四节气气候变化 [J]. 气候与环境研究，23 (6): 670−682. Qian Cheng, Yan Zhongwei, Cao Lijuan, et al. 2018. Climatic changes in the Twenty-four Solar Terms based on temperature observations back to 1873 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (6): 670−682, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18044.

基于 1873 年以来器测气温的二十四节气气候变化

钱诚 [1,2]　严中伟 [1,2]　曹丽娟 [3]　李珍 [1]

1 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室，中国科学院大气物理研究所，北京 100029
2 中国科学院大学，北京 100049
3 中国气象局国家气象信息中心，北京 100081

摘　要　2000 多年来二十四节气已广泛用于指导人们生产和生活。然而传统二十四节气的应用意义在当前全球变暖背景下正在发生变化。气候学二十四节气的提出赋予了二十四节气动态变化的内涵，有利于更好地发挥其现实指导作用。本文利用北京观象台 1940～2017 年和上海徐家汇站 1873～2017 年均一化的逐日气温观测序列，分析了近百余年二十四节气气候变化特征。结果显示，北京 1941～2016 年和上海 1874～2016 年的年平均气温和二十四节气气温都呈现变暖趋势，导致早春到初夏阶段的气候学节气呈现提前的趋势，而夏末到初冬阶段的节气呈现推迟的趋势；这些趋势大部分是统计显著的。北京和上海的极端冷事件（以大寒标准定义）均呈现显著的减少趋势，上海的极端热事件（以大暑标准定义）呈现显著的增多趋势。除了长期趋势之外，上海极端热事件频数和夏季平均气温演变中都存在明显的 60～80 年周期的多年代际变率，和大西洋多年代际振荡相关。相比以往基于 1960 年以来的观测所做的二十四节气气候趋势分析，本文揭示了更完善的长期气候变化特征，有助于从精细化的季节循环演变角度丰富关于近代中国气候变暖的认识，为适应气候变化提供科学基础。

关键词　二十四节气　气候变化　极端气温　多年代际变率　集合经验模分解
文章编号　1006-9585（2018）06-0670-13　　**中图分类号**　P467　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18044

Climatic Changes in the Twenty-Four Solar Terms Based on Temperature Observations Back to 1873

QIAN Cheng[1,2], YAN Zhongwei[1,2], CAO Lijuan[3], and LI Zhen[1]

1 *Key Laboratory of Regional Climate−Environment for Temperate East Asia*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *National Meteorological Information Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081

Abstract　Twenty-four Solar Terms (24STs) have been widely used for guiding human activities in China over more than 2000 years. However, the implication of the conventional 24STs has been changing under global warming. The climatic 24STs proposed recently impose a time-varying characteristic on the conventional 24STs, thus they can better

收稿日期　2018-03-16；**网络预出版日期** 2018-05-28
作者简介　钱诚，男，1980 年出生，博士，研究员，主要从事气候变化检测归因和预测研究。E-mail: qianch@tea.ac.cn
资助项目　国家重点研发计划项目 2016YFA0600404、2017YFC1501801，国家自然科学基金面上项目 41675093，中国科学院国际合作局项目 134111KYSB20160010，中国科学院青年创新促进会 2016075，江苏省气候变化协同创新中心项目
Funded by　National Key Research and Development Program of China (Grants 2016YFA0600404 and 2017YFC1501801), National Natural Science Foundation of China (Grant 41675093), Bureau of International Co-operation Chinese Academy of Sciences (Grant 134111KYSB20160010), the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (Grant 2016075), the Program of Jiangsu Collaborative Innovation Center for Climate Change

serve as guidance for people under current situation. Previous studies only focused on linear trend of the 24STs since 1960. In this study, climatic changes in the 24STs back to 1873 are analyzed based on homogenized daily temperature series at Beijing station for the period 1940–2017 and at Shanghai station for the period 1873–2017. The results show that the annual mean temperature as well as temperatures of the 24STs at Beijing station for the period 1941–2016 and at Shanghai station for the period 1874–2016 all show warming trends, thus resulting in advancing trends during the warming stage (around spring) and delaying trends during the cooling stage (around autumn) in the timings of the climatic Solar Terms in the seasonal cycle. Most of these trends are statistically significant. The occurrence of extreme cold days shows a significant decreasing trend at both stations of Beijing and Shanghai, whereas the occurrence of extreme hot days at Shanghai station shows a significant increasing trend. In addition to the long-term trend, there exists apparent multi-decadal variability with a period of 60–80 years in both the occurrence of extreme hot days and summer temperature at Shanghai station, which is correlated with the Atlantic Multi-decadal Oscillation. These results can provide an important scientific base for climate change adaptation and benefit the understanding of modern climatic warming in China from a perspective of fine evolution of the seasonal cycle.

Keywords Twenty-four Solar Terms, Climate change, Extreme temperature, Multi-decadal variability, Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD)

1 引言

2016 年 11 月 30 日，中国申报的“二十四节气”入选了联合国教科文组织人类非物质文化遗产代表作名录。“二十四节气”是古人通过观察太阳周年运动，认知一年中时令、气候、物候等方面变化规律所形成的知识体系和社会实践。它指导着传统农业生产和日常生活，也是中国传统历法体系及其相关实践活动的重要组成部分，已沿用 2000 多年，现在仍然发挥着指示作用。

传统二十四节气是天文学意义的，是地球人看太阳在黄道上所处的天文位置决定的，反映地球公转产生的周期变化。因此，它们在公历中的日期几乎固定：“上半年来六廿一，下半年来八廿三”（上半年多在公历的 6 日、21 日，下半年多在公历的 8 日、23 日），前后只差 1～2 d。例如，代表蛰虫苏醒、春耕开始的惊蛰每年固定在 3 月 5～7 日中的某一天。然而，二十四节气对人类活动有指导意义的内涵主要在于其相应的气候特征，传统节气没有考虑近代全球变暖因素，因而它的指示效应在全球变暖背景下正在变得不准。比如，2017 年武汉大学樱花进入初花期比往年提前了一周。如果还是按照天文学节气的时间表去赏花，那么就会错过最佳赏花期。

钱诚等（2011）发展了利用集合经验模分解（Ensemble Empirical Mode Decomposition，EEMD）滤波器（Huang and Wu，2008; Wu and Huang，2009）自适应且唯一地确定达到任一阈值温度日期的方法，进而基于器测资料古今结合（“古”是指利用了二十四节气在公历中的日期，“今”是指利用了现代器测气象数据和统计方法）定义了“气候学二十四节气”，定量地刻画了 1960～2008 年中国的二十四节气气候变化特征，揭示了各地二十四节气的气候状况已随全球变暖而发生变异：全国平均而言，早春到初夏阶段的气候学节气显著提前 6～15 d，夏末到初冬阶段的气候学节气显著推迟 5～6 d；大暑天数增加 81%，大寒天数减少 57%；4 个与物候有关的气候学节气各地普遍提前，半干旱区尤为显著等。进一步考虑到近几十年中国快速的城镇化发展使气象站观测的数据处于全球变暖和局地城镇化双重影响下，Qian et al. (2016) 又利用高密度的一般气象站网数据，量化了国家基准、基本气象站网的二十四节气气候变化中城镇化效应的贡献，从而更真实地反映农业热量资源的变化。“气候学二十四节气”是一套随时间、地域变化的指数，赋予了二十四节气动态变化的内涵，有助于在全球变暖和局地城镇化的背景下更确切地发挥二十四节气长期以来蕴含的实践指导作用，有利于古代劳动人民总结的文化遗产的传承。

二十四节气中有 8 个反映四季变化（两分两至和四立），4 个反映和气温间接有关的物候现象或农事活动（惊蛰、清明、小满、芒种），剩下 12 个反映气候状况的节气中有 5 个反映温度变化（小暑、大暑、处暑、小寒、大寒）、7 个反映降水变化（雨水、谷雨、白露、寒露、霜降、小雪、大雪）。其中白露、寒露、霜降 3 个节气表面上反映的是水汽

凝结、凝华现象，但实质上反映出了气温逐渐下降的过程和程度：气温下降到一定程度，水汽出现凝露现象；气温继续下降，不仅凝露增多，而且越来越凉；当温度降至 0 °C 以下，水汽凝华为霜。因此，二十四节气中大部分是直接或间接和气温有关。钱诚等（2011）的“气候学二十四节气”中以气温代表物候节气的变化，得到的基于气温的物候指标变化特征和物候观测很大程度地吻合。比如，观测的白蜡树春季物候（王焕炯等，2012）和基于气温数据的气候学惊蛰的变化趋势空间分布（钱诚等，2011）都显示华北地区是最大变化中心；1952～2007 年华北地区的白蜡树春季物候提前了 16 d，而基于气温数据得到的该地区气候学惊蛰 1961～2007 年提前了 12～16 d，两者高度吻合。

钱诚等（2011）和 Qian et al. (2016) 的研究都是基于 1960 年以后的观测数据的，那么在 1960 年以前开始的更长器测时期气候学意义的二十四节气又是如何演变的？这个问题除了有助于了解近代二十四节气气候长期演变特征，为人类适应气候变化提供科学信息，也有助于从精细化的季节循环角度加深关于器测时期中国气候变暖的认识。本文试图利用尽可能长的北京观象台（1940～2017 年）和上海徐家汇站（1873～2017 年）观测的连续逐日气温序列回答这个问题。北京临近二十四节气起源的黄河中下游地区，而上海具有 1873～2017 年连续的器测气温资料。这两个站也一定程度地反映了更大空间范围的气候特征，例如 Xia et al. (2016) 的图 1 所示。上海徐家汇站的逐日数据已被很多研究使用，但已有研究所用的数据大部分没有经过均一化校订，即没有订正迁址和观测方式变更等引起的非均一性，只是进行了初步的质量检验和控制（徐家良，1993；江志红和丁裕国，1999；穆海振等，2008；周伟东等，2010；史军等，2011）。均一化的数据是定量评估气候变化的基础（严中伟等，2014）。本文将首先根据已有的均一化数据，连接形成两个站均一化的逐日气温长序列，进而进行相应的二十四节气气候变化分析，并利用时间上局部的自适应滤波器——EEMD 方法揭示相关的多尺度特征，特别是多年代际变率。基于尽可能长的近百年器测数据，有助于更好地反映近代气候变暖过程中二十四节气气候的演变及相关的多年代际变率特征，也是以往研究（钱诚等，2011；Qian et al., 2016）未能解答的问题。

2 数据和方法

2.1 数据

本文所用的北京观象台（以下简称北京）和上海徐家汇站（以下简称上海）日平均气温数据是由 3 套均一化数据拼接而成：1）Yan et al. (2001) 订正的 1915～1997 年北京和 1873～1997 年上海均一化逐日平均气温（简称“数据 1”）；2）Li et al. (2016) 基于国家气象信息中心的“中国地面气候资料日值数据集（V3.0）”的 824 个中国基准、基本气象站订正的 1960 年以来的均一化逐日气温数据集（简称“数据 2”）；3）Cao et al. (2016) 订正的 2419 站 1951 年以来的均一化逐日气温数据集（简称“数据 3”）。其中，在数据 1 中，北京 1997 年以前的迁址和观测方式变更等引起的非均一性已根据临近的天津、保定等站进行了校订，而上海则是根据临近的南京、杭州等站进行了校订；数据 2 的均一化气温数据集是利用 MASH 方法（Szentimrey，1999）对迁址和观测方式变更等引起的非均一性进行了校订；数据 3 的均一化数据集是利用 RHtests 方法的 3.0 版本（Wang and Feng，2010）对迁址和观测方式变更等引起的非均一性进行了校订。此外，拼接后的北京和上海逐日数据还利用了均一化的近百年中国 18 站/32 站逐月气温数据集（Cao et al., 2013, 2017）（简称“数据 4”）中的北京和上海数据进行比对。虽然这套数据集中的平均气温是根据最高和最低气温的平均值来表示的，但仍然对本文的结果具有一定的参考价值。

此外，本文在探讨多年代际变率来源时，还用到了 NOAA 重建的第五版海表温度数据（Huang et al., 2017）。由于 1879 年以前海表温度数据质量相对较差（An and Choi，2009），本文只选用 1880 年起的数据进行分析。

2.2 方法

2.2.1 数据拼接方法

北京逐日序列的接法是：1997 年以前都用数据 1，1998 年起接数据 2（图 1a）。因为 1960 年以前数据 1 的年平均值和数据 4 的百年北京序列很接近；而 1960 年以后，数据 1 和数据 2 的年平均值很接近。1960 年代初，数据 2 比数据 1 的略偏高，是因为数据 2 是从 1960 年开始均一化的，没有订正序列端点可能存在的非均一性。

上海逐日序列的接法是：1873～1959 年用数据

1 加上一个平均值（1960 年、1961 年、1962 年这三年数据 1 和数据 3 中徐家汇数据的平均值的偏差），而 1960 年起接数据 3 的徐家汇数据（图 1b）。因为这样接完后的数据 1960 年以前的年平均值和数据 4 的百年上海序列（按接完数据的 2011 年调整平均态差异）接近，而且 1956～1959 年这四年结果和数据 3 的徐家汇数据完全一样。1956 年以前数据 3 偏低是因为 1956 年有迁址，而数据 3 是从 1951 年开始均一化的，序列端点附近的非均一性难以检测，所以没订正。此外，数据 1 在进行平均态校订后 1960～1966 年的结果也和数据 3 的徐家汇数据非常接近，后期数据 1 偏低是因为 1965～1997 年订正了 0.01 °C/a 的城市化效应（Yan et al., 2001）。

2.2.2　气候学二十四节气的确定和分析方法

对逐日数据中闰年的处理方法参照 Qian et al.（2011b）：去掉 2 月 29 日、2 月 28 日的值用 28 日和 29 日的平均值代替。这样既考虑了闰年的影响，又使得每年都是 365 个值，便于进行矩阵运算。确定气候学二十四节气的方法和钱诚等（2011）一样，借助 EEMD 方法，它是经验模分解（EMD）（Huang et al., 1998; Huang and Wu, 2008）的改进版，已广泛应用于气候变化研究（Qian et al., 2009, 2010；梁萍和陈葆德，2015；Qian, 2016a；Xia et al., 2016）。具体步骤见钱诚等（2011），这里简单介绍主要思想：1）滤波：采用 Qian et al.（2009）提出的基于 EEMD 的方法平滑序列，滤掉年内尺度的高频噪声，然后就可以“自适应且唯一地”确定每年的气候学二十四节气时间。之所以滤去高频噪声，是因

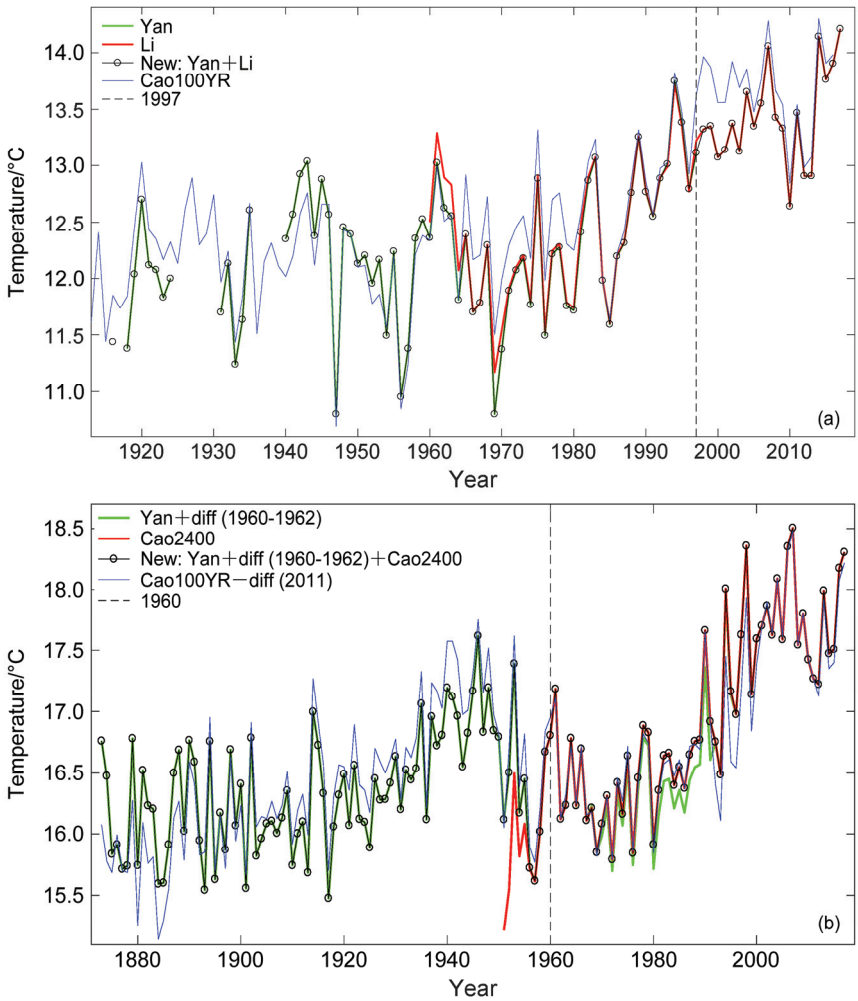

图 1　拼接后的（a）北京和（b）上海百年逐日平均气温序列计算的年平均值及其和相关数据的比较。黑色为拼接后数据；绿色为数据 1，其中（b）调整了一个偏差；红色为数据 2（a）和数据 3（b）的近 60 年数据；蓝色为数据 4，其中（b）调整了一个偏差

Fig. 1　Time series of annual mean temperature calculated from the connected daily mean temperature data (black lines) at (a) Beijing and (b) Shanghai stations and the comparisons with related data, including data from Yan et al. (2001) (green lines, with an adjust in the lower figure), Li et al. (2015) (a) and Cao et al. (2016) (b) (red lines), and Cao et al. (2013) (blue lines, with an adjust in the lower figure)

为有天气波动存在时，某个节气日的原始气温值并不能反映真实的气候变化趋势；而且，在采用阈值的方式来确定每个气候节气的时间节点时，也会面临因天气波动造成原始气温与阈值有多个交点而使节气时间节点有多个选择的困难（Qian et al., 2009, 2011a）。本文对有连续逐日气温的 1940～2017 年北京和 1873～2017 年上海的序列分别进行 EEMD 处理（信噪比为 0.3，集合次数是 1000 次），得到年循环及更长尺度分量（annual cycle and longer timescale component，ALC）（Qian et al., 2009）的光滑序列。为去掉边界效应的影响，参照 Qian et al.（2010）去掉第一年和最后一年，即分析时段为北京 1941～2016 年和上海 1874～2016 年。2）确定阈值：根据 1961～1990 年气候基准时段的 ALC 序列的气候平均值，确定每个气候学节气的阈值（表 1）。3）确定节气时间：根据每年的 ALC 序列和每个气候学节气日（立春、小暑、大暑、立秋、冬至、小寒和大寒这 7 个节气除外）阈值的交点（每年一般有两个，前半年节气取第一个，后半年节气取第二个）所在的日期在 1～365 d 中的时间序号来确定每年每个气候学节气日的时间。分别计算这些时间点的线性趋势，得到每个气候学节气的提前或推迟趋势，并判断趋势的统计显著性（结果见表 1）。

本文还基于 ALC 序列，计算了二十四个节气日（例如，立春一般是在 2 月 3～5 日，取这 3 天的平均）的气温变化线性趋势，并判断趋势的统计显著性（结果见表 1）。此外，还以大寒和大暑作为判断极端冷、热事件的阈值标准，统计了其频数演变和线性趋势。线性趋势是用最小二乘法计算的，并在考虑序列一阶自相关的基础上进行统计显著性检验（Hartmann et al., 2013；Qian, 2016b）。该检验方法具体如下：

对于含有一阶自相关 r_1 的最小二乘回归残差的目标序列（长度为 N），其有效样本个数的表达式为

$$N_e = \begin{cases} N\dfrac{1-r_1}{1+r_1}, & r_1 > 0 \\ N, & r_1 \leqslant 0 \end{cases} \quad (1)$$

在给定的概率水平为 p（例如 95%）时，带 p 置信区间的回归系数为

$$b = \hat{b} \pm q\hat{\sigma}_b, \quad (2)$$

表 1 北京（1941～2016 年）和上海（1874～2016 年）的二十四节气气候变化趋势

Table 1 Linear trends in climatic changes of the Solar Terms at Beijing station (1941−2016) and Shanghai station (1874−2016)

		阈值/°C		增温趋势/°C (10 a)$^{-1}$		提前趋势/d (10 a)$^{-1}$	
节气	时间	北京	上海	北京	上海	北京	上海
立春	2 月 3～5 日	−3.03	4.48	0.37**	0.12**		
雨水	2 月 18～20 日	−0.65	5.74	0.41**	0.13**	2.44**	
惊蛰	3 月 5～7 日	2.71	7.63	0.40**	0.13**	1.65**	0.99**
春分	3 月 20～21 日	6.57	9.93	0.23**	0.08**	1.27**	0.74**
清明	4 月 4～6 日	10.91	12.69	0.28**	0.11**	1.06**	0.64**
谷雨	4 月 19～21 日	14.86	15.41	0.22**	0.11**	0.97**	0.64**
立夏	5 月 5～7 日	18.49	18.15	0.18**	0.10**	0.93**	0.62**
小满	5 月 20～22 日	21.23	20.53	0.14*	0.08**	0.94*	0.57**
芒种	6 月 5～7 日	23.4	22.83	0.1	0.07**	1	0.48**
夏至	6 月 21～22 日	25.07	25.18	0.04	0.04**	0.95	0.45**
小暑	7 月 6～8 日	26.17	27.4	0.05	0.07**		
大暑	7 月 22～24 日	26.42	28.75	0.09	0.07**		
立秋	8 月 7～9 日	25.71	28.85	0.14**	0.07**		
处暑	8 月 22～24 日	24.14	27.77	0.18**	0.07**	−1.30**	
白露	9 月 7～9 日	21.6	25.66	0.20**	0.08**	−0.94**	−0.54**
秋分	9 月 22～24 日	18.55	23.17	0.18**	0.10**	−0.70**	−0.61**
寒露	10 月 8～9 日	14.87	20.37	0.10*	0.09**	−0.56*	−0.72**
霜降	10 月 23～24 日	10.92	17.48	0.09*	0.10**	−0.43	−0.72**
立冬	11 月 7～8 日	6.81	14.36	0.09*	0.10**	−0.42	−0.70**
小雪	11 月 22～23 日	2.88	11.14	0.12**	0.09**	−0.58*	−0.64**
大雪	12 月 6～8 日	−0.37	8.26	0.23**	0.12**	−1.14**	
冬至	12 月 21～23 日	−2.80	5.93	0.27**	0.10**		
小寒	1 月 5～7 日	−4.16	4.44	0.28**	0.10**		
大寒	1 月 20～21 日	−4.19	4.03	0.21 **	0.07**		

注：趋势只列出最佳估计值，略去置信区间；“提前趋势”中符号为正表示提前，负表示推迟。*（**）表示线性趋势在0.05（0.01）水平下统计显著。

其中，$\hat{b}$ 是线性趋势的最佳估计值，q 是 N_e-2 个自由度的学生 t 分布的第 $(1+p)/2$ 分位数，$\hat{\sigma}_b$ 是线性趋势斜率的方差，它的具体计算公式为

$$\hat{\sigma}_b=\left[\frac{\sum_{t=1}^{N}\hat{e}(t)^2}{N_e-2}\Bigg/\sum_{t=1}^{N}(t-\bar{t})^2\right]^{\frac{1}{2}},\qquad(3)$$

式中 $\hat{e}(t)$ 是最小二乘回归残差，t 是时刻，$\bar{t}$ 为 t 的平均值。如果 b 不包括零，则待检验序列的线性趋势是 $1-p$ 水平下统计显著的。

2.2.3　EEMD 多时间尺度分析

除了前面确定气候学二十四节气时用到 EEMD 方法之外，本文还用该方法特别关注了其中相应的多年代际变率和自适应的长期趋势。如前所述，EEMD 方法是一种自适应的滤波器，它把一个复杂的数据分解为有限个不同时间尺度的振荡分量。并且，它利用多次测量取平均值的原理，很大程度地抗噪声干扰。和前面一样，把分析时段（北京 1941～2016 年和上海 1874～2016 年）的目标序列进行 EEMD 处理，信噪比和集合次数和前面一样，得到的最后一个分量均视为长期趋势。对于上海年分辨率的序列，得到的第 5 个分量是多年代际变率，把第 5 个以及之后的分量加起来作为多年代际以上尺度的低频变率。北京由于序列较短，只关注长期趋势。本文的距平参照期和英国东安格利亚大学气候研究中心（CRU）数据以及气候变化检测和指数专家组（ETCCDI）一样，是 1961～1990 年。

3　结果分析

3.1　二十四节气气候变化特征

图 2 显示，北京和上海近百余年的年平均气温总体的演变是比较吻合的，反映出长期变暖的特征。两个站的结果配合起来一定程度代表了不同起始时刻的变化趋势。在本文分析的时段内（北京 1941～2016 年和上海 1874～2016 年），北京年平均气温线性趋势为 0.21 °C (10 a)$^{-1}$，在 0.01 水平下统计显著；上海年平均气温线性趋势为 0.10 °C (10 a)$^{-1}$，也在 0.01 水平下统计显著。但从不同节气的增温趋势（表 1）来看，季节循环的不同阶段增温趋势存在很大的差异。对于北京而言，不同节气的增温趋势介于 0.04～0.41 °C (10 a)$^{-1}$ 之间，夏至最小、雨水最大；除芒种、夏至、小暑和大暑 4 个节气增温趋势统计不显著外，其余节气都至少在 0.05 水平下统计显著增温。对于上海而言，不同节气的增温趋

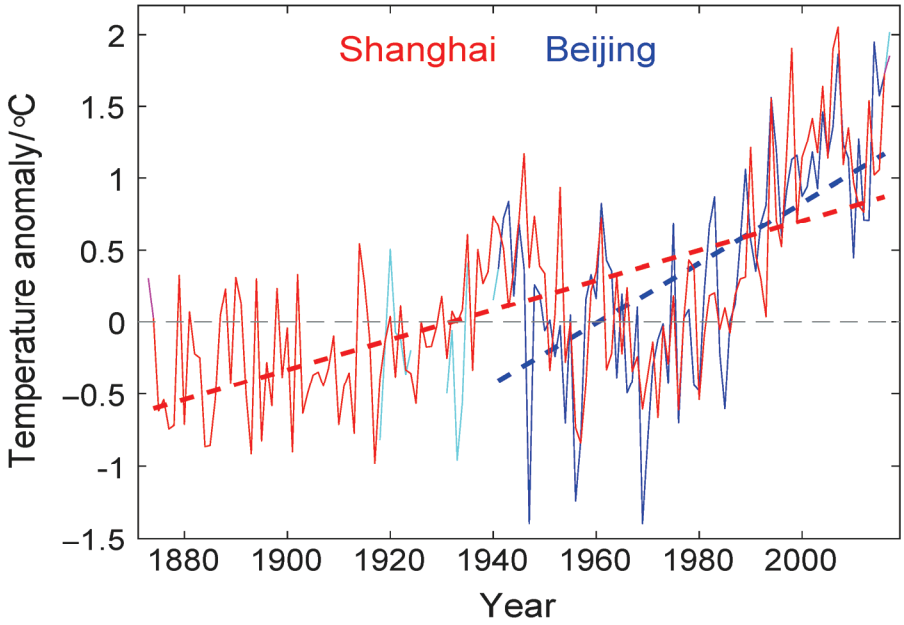

图 2　北京 1941～2016 年（蓝色）和上海 1874～2016 年（红色）的年平均气温距平序列（实线）及其线性趋势（虚线）。天蓝色和紫色分别是北京和上海各自的最长序列

Fig. 2　Time series of annual mean temperature anomalies at Beijing station during 1941−2016 (blue solid line) and Shanghai station during 1874−2016 (red solid lines), and their corresponding linear trends (dashed lines). Cyan and magenta lines are the longest series for Beijing and Shanghai stations, respectivelys

势介于 0.04～0.13 °C (10 a)$^{-1}$ 之间，也是夏至最小、雨水最大，但全部节气都在 0.01 水平下统计显著。这两个站雨水增温趋势最大的结果和钱诚等（2011）基于 1960 年以后的数据揭示的结果是一致的。其中北京雨水节气的阈值位于 0 °C 附近（表 1），符合钱诚等（2011）指出的冰雪消融期，变暖和冰雪融化正反馈的解释；但上海雨水节气的阈值在 5.7 °C 附近（表 1），这个时间节点增温偏快，可能是和晚冬—早春时期的东亚冬季风减弱有关（Qian et al., 2011a）。

在上述季节循环整体抬升的长期变化背景下，北京和上海早春到初夏阶段的气候学节气均呈现提前的趋势，而夏末到初冬阶段的节气均呈现推迟的趋势，大部分是统计显著的（表 1 和图 3）。这和钱诚等（2011）基于 1960 年以后数据的结果也是一致的。对于北京而言，提前的趋势在 0.93～2.44 d (10 a)$^{-1}$ 之间，雨水最大，从雨水到小满都至少在 0.05 水平下统计显著；而推迟的趋势在 0.42～1.3 d (10 a)$^{-1}$ 之间，处暑最大，处暑、白露、秋分、寒露、小雪和大雪都至少在 0.05 水平下统计显著。对于上海而言，提前的趋势在 0.45～0.99 d (10 a)$^{-1}$ 之间，惊蛰最大；而推迟的趋势在 0.54～0.72 d (10 a)$^{-1}$ 之间；提前或推迟的趋势都在 0.01 水平下统计显著。需要指出的是上海的雨水、处暑和大雪 3 个节气都有没达到阈值的年份，因而没统计提前或推迟的情况（表 1）。这表明，上海长期变暖给季节循环带来的影响还是比较大的。此外，上海的立秋比大暑还要稍微热一点（表 1），这是比较特别的情况（对应华东一带俗称的“秋老虎”）。

3.2 极端冷、暖的频数变化

对于近期普遍关注的极端冷事件和极端热事件发生频数的变化趋势，这里参照钱诚等（2011）

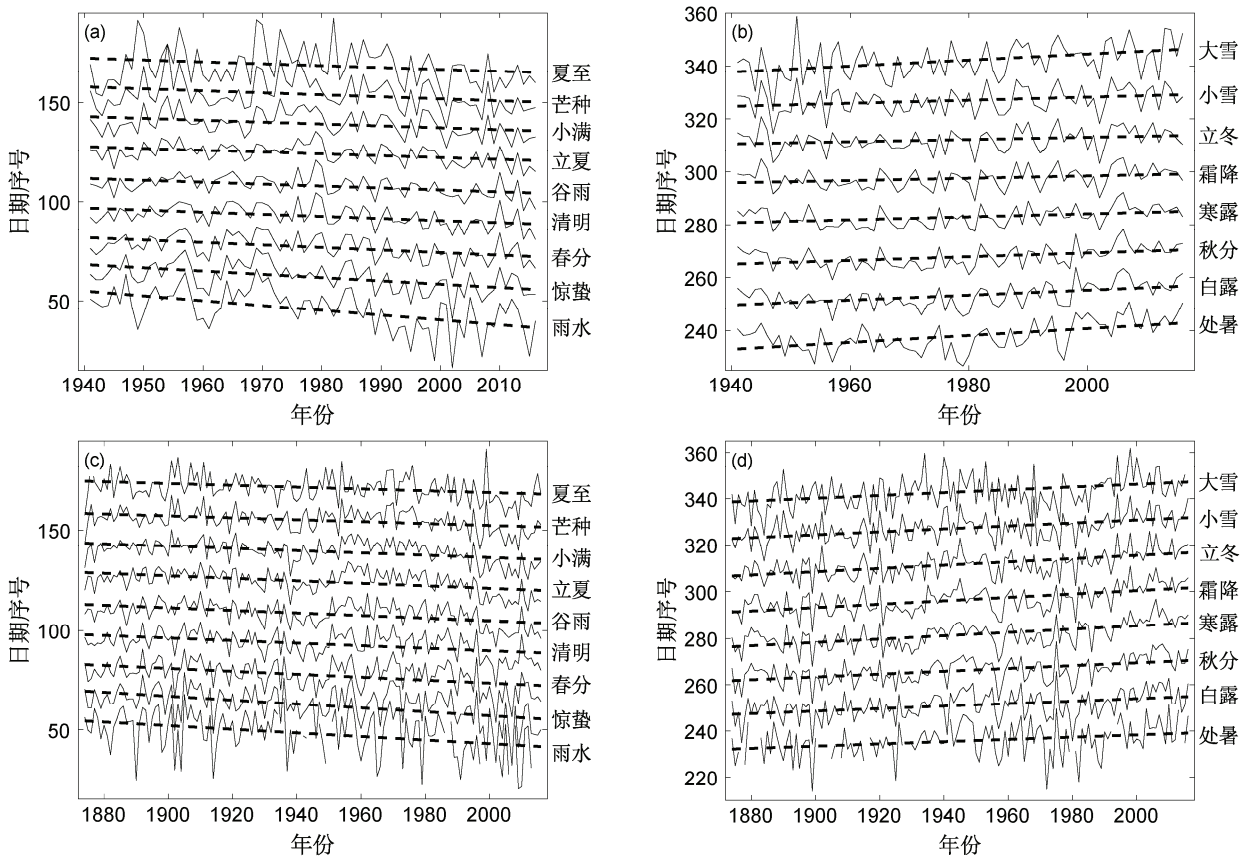

图 3 （a、b）北京 1941～2016 年和（c、d）上海 1874～2016 年的气候学二十四节气提前或推迟的演变（左列：季节性升温时段；右列：季节性降温时段）。实线表示各个气候节气每年的时间序号，虚线表示线性趋势。其中，上海的气候学雨水、处暑和大雪[见 Qian et al.（2016）的表 1]有的年份没有达到阈值，设为缺测

Fig. 3 Linear trends (dashed lines) in the timing (solid lines) of the Solar Terms in the seasonal warming period (left panel) and the seasonal cooling period (right panel) at (a, b) Beijing station during 1941−2016 and (c, d) Shanghai station during 1874−2016. There are years in which no intersects with the thresholds are found for three timings, including Rain Water, Limit of Heat, and Great Snow [see the Table 1 in Qian et al. (2016) for the explanations] in Fig. 3c and Fig. 3d. They are considered as missing values

采用二十四节气中的大寒和大暑作为阈值标准（在参照期 1961～1990 年内 ALC 序列相应的平均值），分析两个站达到大寒标准的频数和达到大暑标准的频数的演变，用以反映器测时期极端冷事件和极端热事件发生频数的长期演变。图 4 显示，北京达到大寒标准的频数线性趋势为－3.22 d (10 a)$^{-1}$（0.01 水平下统计显著），最近 10 年（2007～2016 年）的平均频数（16 d）相比最初 10 年（1941～1950 年）减少了 52.2%；按年代来说，2000 年代（2000～2009 年）的大寒日数（17.5 d）只有 1940 年代的一半（表 2）。达到大暑标准的频数线性趋势为 1.70 d (10 a)$^{-1}$（统计不显著），最近 10 年的平均频数（48.1 d）相比最初 10 年增加了 16.8%；按年代来说，2000 年代的大暑日数（46.4 d）比 1940 年代增加了 11.8%，比 1950 年代更是增加了 77.8%。1940 年代初北京的相对偏暖期在年平均气温和极端冷、暖频数中都有所反映（图 2 和图 4a、4b）。而上海达到大寒标准的频数线性趋势为－1.22 d (10 a)$^{-1}$（0.01 水平下统计显著），最近 10 年（2007～2016 年）的平均频数（22.3 d）相比最初 10 年（1874～1883 年）减少了 46.0%；按年代来说，2000 年代的大寒日数（21.8 d）只有 1880 年代的大约一半。达到大暑标准的频数线性趋势为 1.04 d (10 a)$^{-1}$（0.01 水平下统计显著），最近 10 年的平均频数（41.5 d）相比最初 10 年增加了 53.1%；按年代来说，2000 年代的大暑日数（45.1 d）比 1880 年代增加了将近一半。除了趋势之外，这些频数的演变还存在较大的年际差异（图 4）和年代（表 2）、年代际波动（图 4）。基于大寒、大暑阈值所反映的上海极端冷、暖频数演变趋势和基于其他定义标准所反映的基本特征是一致的，如日最高温超过 35 度的频数、一年中日最高温的最大值、日最高温超过第 90 个百分位的夏季累计频数（Qian，2016b）和连续 3 天日平均温超过气候态季节循环第 95 个百分位（Xia et al., 2016）或连续 3 天日最高温超过第 90 个百分位（Qian, 2016b）的热浪频数等，均呈现 1960 年代早期至 1970 年代末减少转为 1980 年代开始增多的非线性趋势或多年代际波动。

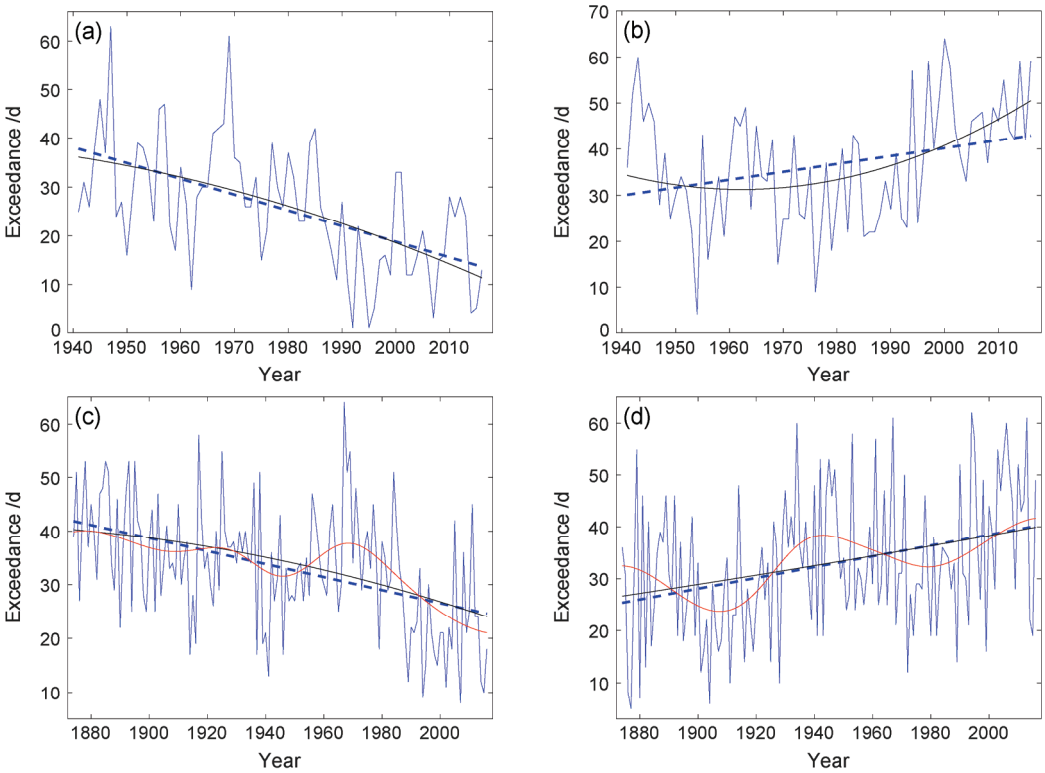

图 4 （a、b）北京 1941～2016 年和（c、d）上海 1874～2016 年达到大寒标准（左列）和达到大暑标准（右列）的频数演变（蓝实线）、相应的线性趋势（蓝虚线）、EEMD 趋势（黑实线）和 EEMD 多年代际以上尺度低频变率（红实线，只分析上海）

Fig. 4 Time series (blue solid lines) of the occurrence of extreme cold day (left column) and extreme hot day (right column) at (a, b) Beijing station for the period 1941−2016 and (c, d) Shanghai station for the period 1874−2016, and their corresponding linear trends (dashed lines), EEMD trends (black lines) and low-frequency variations with a period equal to or longer than multi-decadal timescale calculated from EEMD filter (red lines and only Shanghai is analyzed)

表 2 不同年代北京和上海达到大寒、大暑标准的频数均值

Table 2 Decadal mean occurrences of extreme cold days and extreme hot days d

年代	大寒日数		大暑日数	
	北京	上海	北京	上海
1880 年代		42.4		30.6
1890 年代		37.2		29.3
1900 年代		35.5		20.1
1910 年代		34.5		24.5
1920 年代		36.8		28.9
1930 年代		35.5		38.2
1940 年代	35	27.6	41.5	40.4
1950 年代	31	34.4	26.1	32.5
1960 年代	34.5	40.4	37.3	36.4
1970 年代	28.6	35.9	26.6	30.1
1980 年代	27.2	31.9	29.9	28.6
1990 年代	12.3	20.6	38.2	38.1
2000 年代	17.5	21.8	46.4	45.1

从 EEMD 分析揭示的长期趋势和多年代际以上尺度低频变率来看，图 4 显示，北京达到大寒标准的频数、上海达到大寒和大暑标准的频数的非线性趋势都和前述的线性趋势很接近（图 4a、4c、4d）；但北京达到大暑标准的频数的非线性趋势则和线性趋势差别较大，更多地反映出多年代际尺度的转折特征：从减少到增多（图 4b）。这种特征从更长序列的上海达到大暑标准的频数中清楚地得到反映，其中叠加了明显的 60～80 a 左右周期的多年代际变率：1880 年代初、1940 年代初和近期为相对多发期，而 1910 年左右和 1980 年左右是相对偏少期，中间包括了两段增多期（1910～1940 年代初和 1980～2016 年）和两段减少期（1880～1910 年和 1940 年代初至 1980 年）（图 4d）。60～80 a 左右周期的波动在上海达到大寒标准的频数演变中则不是很明显，更多地表现为逐渐减少，除了 1970 年前后出现较大的年代际尺度大寒频发期（图 4c）。

图 5 显示，分析时段内，北京和上海达到大寒标准的频数和冬季平均气温的关系并不是很密切（图 5a、5c），北京的解释方差（R^2）更大一些，也只有 0.4；而两个站达到大暑标准的频数和夏季平均气温则关系很紧密，北京的解释方差高达 0.89，上海虽然样本更多，但也有 0.8（图 5b、5d）。因此，分析夏季平均气温的演变就可以很大程度地理解达到大暑标准的频数演变成因。图 6 显示，上海夏

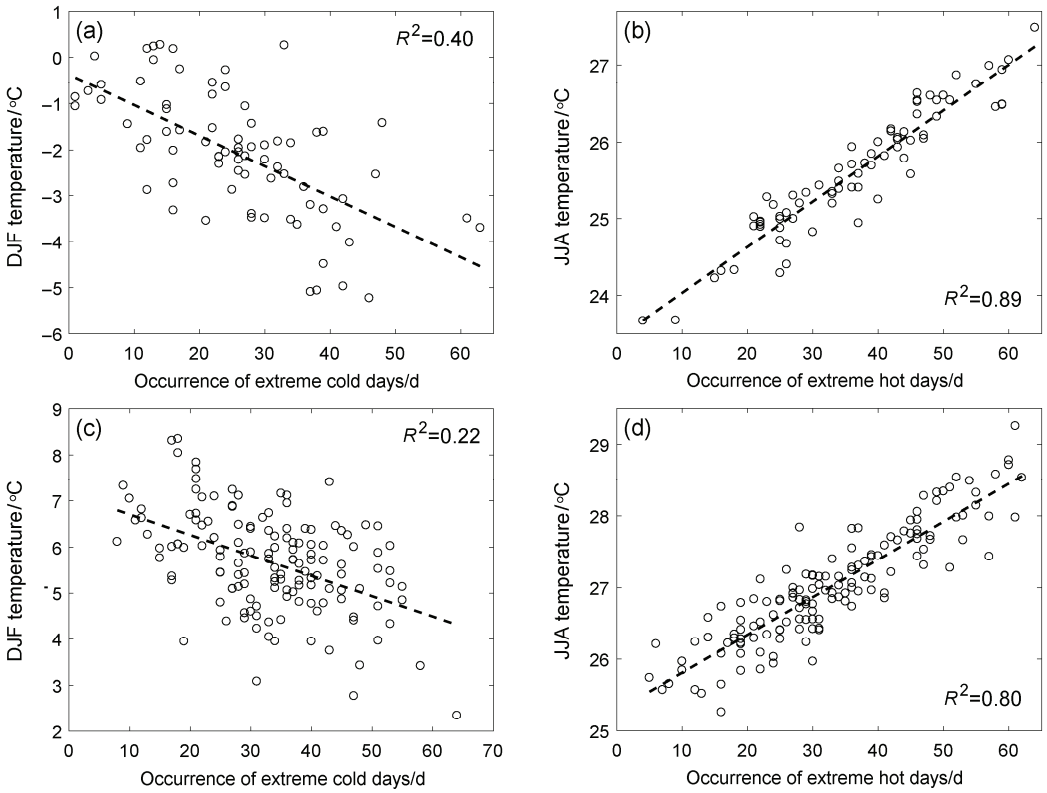

图 5 （a、b）北京 1941～2016 年和（c、d）上海 1874～2016 年达到大寒和大暑标准的极端冷（左列）、暖（右列）日发生频次和冬季、夏季平均气温的关系

Fig. 5 Relationships between the occurrence of extreme cold days and winter temperature (left column) or between the occurrence of extreme hot days and summer temperature (right column) at Beijing station for the period 1941−2016 (upper) and Shanghai station for the period 1874−2016 (lower)

季平均气温呈现长期变暖趋势，1874～2016 年间线性趋势为 0.07 ºC (10 a)$^{-1}$（0.01 水平下统计显著）。EEMD 趋势进一步揭示变暖的速率并不是一成不变的，而是逐渐加速。叠加在这个非线性的趋势之上，还存在一个 60～80 a 周期的多年代际变率。和前述达到大暑标准频数的 EEMD 分析相似，这个多年代际变率使夏季平均气温呈现两段增温期（1910～1940 年代初和 1980～2016 年）和两段降温期（1880～1910 年和 1940 年代初至 1980 年）。北京虽然由于序列较短没有进行这些分析，但从图 6 可以看出，它和上海的序列很接近，从中可以推断出大致的变化。

为了考察上海夏季多年代际变率的来源，计算了该站夏季平均气温的多年代际变率和全球海表温度场的相关系数分布（图 7）。从中可以看出，这个多年代际变率主要信号很可能来自北大西洋；当

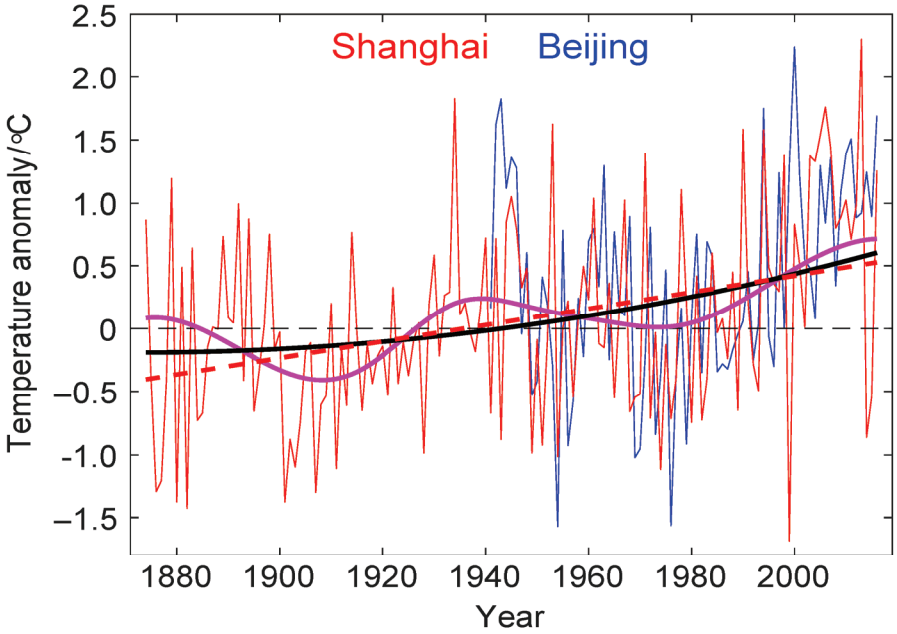

图 6　北京 1941～2016 年（蓝色）和上海 1874～2016 年（红实线）夏季平均气温距平序列以及上海相应的线性趋势（红虚线）、EEMD 趋势（黑实线）、EEMD 多年代际以上尺度低频变率（紫色）

Fig. 6　Time series of summer temperature anomaly at Beijing station during 1941−2016 (blue line) and Shanghai station during 1874−2016 (red solid line). Along with the linear trend (red dashed line), EEMD trend (black solid line), and low-frequency variations with a period equal to or longer than multi-decadal timescale calculated from EEMD filter (magenta line) for Shanghai station

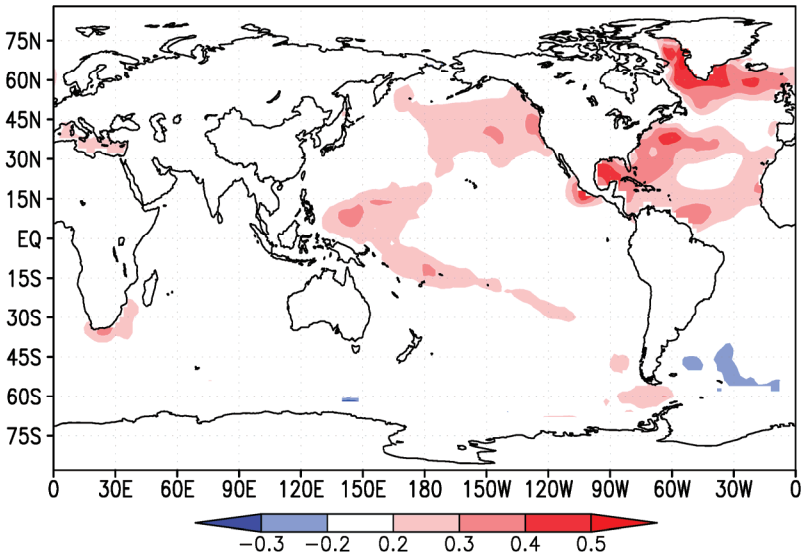

图 7　上海 1880～2016 年夏季平均气温的多年代际变率和全球海表温度场的相关系数分布

Fig. 7　Correlation coefficients between multi-decadal variability in summer temperature at Shanghai station and global gridded sea surface temperature during 1880−2016

北大西洋海表温度偏暖时，上海夏季平均温度偏高；同时，南大西洋靠近极区附近存在微弱的负相关区域。这类似大西洋多年代际振荡（Atlantic Multi-decadal Oscillation，AMO）的空间模态。陈红梅等（2005）分析过上海夏季平均气温与太平洋海温的关系，指出在年代际尺度上，两者同期显著正相关区域位于西太平洋中北部、东太平洋大部以及太平洋中部的部分地区，其中暖池区的正相关最强。本文关注多年代际尺度，得到的空间图像和他们不同，太平洋上虽然也有部分正相关区域，但北大西洋是相关系数最大的地区。Xia et al. (2016) 指出 AMO 指数和上海 7 月、8 月的气温正相关，进而和该地区的热浪有联系。Lu et al. (2006) 用 HadCM3 数值模式揭示正的 AMO 对应北大西洋暖异常、南大西洋冷异常，会引起东亚夏季风增强，中国中部和北方地区夏季气温偏高。Wang et al.(2009)用两个大气模式实验揭示 AMO 通过使欧亚地区对流层中高层变暖而增强亚洲夏季风。Qian(2016a)在考虑城市化效应后揭示整个中国东部近百年的年平均气温的多年代际变率可能和 AMO 有关。上海夏季极端和平均气温演变中的多年代际变率是否源自 AMO 及联系的物理过程值得进一步研究。

4 结论和讨论

本文基于均一化的近百年北京和上海逐日气温序列，分析了二十四节气气候变化，得到如下主要结论：

（1）北京 1941～2016 年和上海 1874～2016 年的年平均气温和二十四节气气温都呈现变暖趋势，导致早春到初夏阶段的气候学节气呈现提前趋势，而夏末到初冬阶段的节气呈现推迟趋势，这些趋势大部分是统计显著的。

（2）北京 1941～2016 年和上海 1874～2016 年的极端冷事件（以大寒标准定义）均呈现显著的减少趋势，上海的极端热事件（以大暑标准定义）呈现显著的增多趋势。

（3）上海极端热事件频数和夏季平均气温演变中都存在明显的 60～80 a 周期的多年代际变率，和大西洋多年代际振荡相关。

气候变暖导致早春到初夏阶段的气候学节气呈现提前的趋势，而夏末到初冬阶段的节气呈现推迟的趋势，这在物候观测中得到反映。例如，华北平原 36 个农业气象站点 1981～2009 年冬小麦物候观测资料的分析显示，播种期、出苗期和越冬期推迟约 1.5 d (10 a)$^{-1}$，而返青期、开花期和成熟期分别提前 1.1 d (10 a)$^{-1}$、2.7 d (10 a)$^{-1}$ 和 1.4 d (10 a)$^{-1}$ (Xiao et al., 2013)。气候变化对小麦物候期变迁有重要影响 (Tao et al., 2012)。总体而言，气候变暖使小麦、玉米和水稻等生产中作物春季适宜播期提前，秋季适宜播期推迟（雷秋良等，2014）。但是温度变化带来的这些效应对最终农业产量的影响则比较复杂，因地而异。作物发育、产量形成、种植模式和区域布局受光照、温度和降水变化的协同作用影响。另一方面，目前极端高温出现频率的增加会使水稻等作物生育期缩短，生长量减少，可能会抵消全年生长期延长的正向促进效果（刘娟等，2010; 雷秋良等，2014）。

此外，早春的气候学节气提前、初冬的气候学节气推迟，使冷季缩短。从理论上讲，采暖具有很大的节能潜力。采暖期缩短，能源消耗减少，有利于缓解冬季华北重污染区燃煤供暖造成的空气污染；该地区供暖导致的大气污染物排放量减少也会有利于减缓下游的长三角地区的空气污染。另一方面，初夏的气候学节气提前、夏末的气候学节气推迟，则使得高温季延长，制冷耗能期延长，促使用电量增加。

致谢 感谢两位审稿人对本文的宝贵意见。NOAA 海表温度数据来自 http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html[2018-03-05]。

参考文献（References）

An S I, Choi J. 2009. Seasonal locking of the ENSO asymmetry and its influence on the seasonal cycle of the tropical eastern Pacific sea surface temperature [J]. Atmospheric Research, 94: 3–9, doi:10.1016/j.atmosres.2008.09.029.

Cao L J, Zhao P, Yan Z W, et al. 2013. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century [J]. J. Geophys. Res., 118: 8197–8207, doi:10.1002/jgrd.50615.

Cao L J, Zhu Y N, Tang G L, et al. 2016. Climatic warming in China according to a homogenized data set from 2419 stations [J]. International Journal of Climatology, 36: 4384–4392, doi:10.1002/joc.4639.

Cao L J, Yan Z W, Zhao P, et al. 2017. Climatic warming in China during 1901–2015 based on an extended dataset of instrumental temperature records [J]. Environmental Research Letters, 12: 064005, doi:10.1088/1748-9326/aa68e8.

陈红梅, 张耀存, 何凤翩. 2005. 上海气温与太平洋海温的相关关系及

年代际差异 [J]. 南京气象学院学报, 28: 778–786. Chen Hongmei, Zhang Yaocun, He Fengpian. 2005. Correlations between temperature in Shanghai and Pacific SST and their interdecadal variations [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28: 778–786, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2005.06.008.

Hartmann D L, Klein Tank A M G, Rusticucci M, et al. 2013. Observations: Atmosphere and Surface Supplementary Material. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535pp.

Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al. 2017. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5), Upgrades, validations, and intercomparisons [J]. Journal of Climate, 30: 8179−8205, doi:10.1175/JCLI-D-16-0836.1.

Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 454: 903−995, doi:10.1098/rspa.1998.0193.

Huang N E, Wu Z H. 2008. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies [J]. Rev. Geophys., 46: RG2006, doi:10.1029/2007RG000228.

江志红, 丁裕国. 1999. 近百年上海气候变暖过程的再认识——平均温度与最低、最高温度的对比 [J]. 应用气象学报, 10: 151–159. Jiang Zhihong, Ding Yuguo. 1999. Renewed study on the warming process of Shanghai during the past 100 years [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 10: 151–159, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.1999.02.003.

雷秋良, 徐建文, 姜帅, 等. 2014. 气候变化对中国主要作物生育期的影响研究进展 [J]. 中国农学通报, 30: 205–209. Lei Qiuliang, Xu Jianwen, Jiang Shuai, et al. 2014. The knowledge of climate change impacts on growth durations of major crops in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin (in Chinese), 30: 205–209.

Li Z, Cao L J, Zhu Y N, et al. 2016. Comparison of two homogenized datasets of daily maximum/mean/minimum temperature in China during 1960–2013 [J]. J. Meteor. Res., 30: 53–66, doi:10.1007/s13351-016-5054-x.

梁萍, 陈葆德. 2015. 近 139 年中国东南部站点气温变化的多尺度特征 [J]. 高原气象, 34: 1323–1329. Liang Ping, Chen Baode. 2015. Multiscale features of climate change for temperature of centurial weather stations over southeast China during latest 139 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34: 1323–1329, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00058.

刘娟, 杨沈斌, 王主玉, 等. 2010. 长江中下游水稻生长季极端高温和低温事件的演变趋势 [J]. 安徽农业科学, 38: 13881–13884, 13901. Liu Juan, Yang Shenbin, Wang Zhuyu, et al. 2010. Evolution trend of extreme high and low temperature events during rice growing period in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese), 38: 13881–13884, 13901, doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2010.25.128.

Lu R Y, Dong B W, Ding H. 2006. Impact of the Atlantic multidecadal oscillation on the Asian summer monsoon [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L24701, doi:10.1029/2006GL027655.

穆海振, 孔春燕, 汤绪, 等. 2008. 上海气温变化及城市化影响初步分析 [J]. 热带气象学报, 24: 672–678. Mu Haizhen, Kong Chunyan, Tang Xu, et al. 2008. Preliminary analysis of temperature change in Shanghai and urbanization impacts [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24: 672–678, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2008.06.012.

Qian C. 2016a. Disentangling the urbanization effect, multi-decadal variability, and secular trend in temperature in eastern China during 1909–2010 [J]. Atmospheric Science Letters, 17: 177–182, doi:10.1002/asl.640.

Qian C. 2016b. On trend estimation and significance testing for non-Gaussian and serially dependent data: Quantifying the urbanization effect on trends in hot extremes in the megacity of Shanghai [J]. Climate Dyn., 47: 329–344, doi:10.1007/s00382-015-2838-0.

Qian C, Fu C B, Wu Z H, et al. 2009. On the secular change of spring onset at Stockholm [J]. Geophys. Res. Lett., 36: L12706, doi:10.1029/2009GL038617.

Qian C, Fu C B, Wu Z H, et al. 2011a. The role of changes in the annual cycle in earlier onset of climatic spring in northern China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28: 284–296, doi:10.1007/s00376-010-9221-1.

Qian C, Ren G Y, Zhou Y Q. 2016. Urbanization effects on climatic changes in 24 particular timings of the seasonal cycle in the middle and lower reaches of the Yellow River [J]. Theor. Appl. Climatol., 124: 781–791, doi:10.1007/s00704-015-1446-6.

Qian C, Wu Z H, Fu C B, et al. 2010. On multi-timescale variability of temperature in China in modulated annual cycle reference frame [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27: 1169−1182, doi:10.1007/s00376-009-9121-4.

钱诚, 严中伟, 符淙斌. 2011. 1960～2008 年中国二十四节气气候变化 [J]. 科学通报, 56: 3011–3020. Qian Cheng, Yan Zhongwei, Fu Congbin. 2012. Climatic changes in the Twenty-four Solar Terms during 1960–2008 [J]. Chinese Science Bulletin, 57: 276–286.

Qian C, Yan Z W, Wu Z H, et al. 2011b. Trends in temperature extremes in association with weather-intraseasonal fluctuations in eastern China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28: 297–309, doi:10.1007/s00376-010-9242-9.

史军, 崔林丽, 田展, 等. 2011. 上海百余年来气温日间波动特征及城市化影响 [J]. 资源科学, 33: 989–994. Shi Jun, Cui Linli, Tian Zhan, et al. 2011. Two-day fluctuations of temperature and the impacts of urbanization in Shanghai during the period 1873–2009 [J]. Resources Science (in Chinese), 33: 989–994.

Szentimrey T. 1999. Multiple analysis of series for homogenization (MASH) [C]//Proceeding of the 2nd Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data. Geneva: WMO, 27–46.

Tao F L, Zhang S, Zhang Z. 2012. Spatiotemporal changes of wheat phenology in China under the effects of temperature, day length and cultivar thermal characteristics [J]. European Journal of Agronomy, 43: 201–212, doi:10.1016/j.eja.2012.07.005.

王焕炯, 戴君虎, 葛全胜. 2012. 1952～2007 年中国白蜡树春季物候时空变化分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 42: 701–710. Wang Huanjiong, Dai Junhu, Ge Quansheng. 2012. The spatiotemporal characteristics of

spring phenophase changes of *Fraxinus chinensis* in China from 1952 to 2007 [J]. Science China Earth Sciences, 55: 991–1000, doi:10.1007/s11430-011-4349-0.

Wang X L, Feng Y. 2010. RHtestsV3 User Manual [R]. Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada, Toronto, Ontario, Canada, 27pp.

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., 114: D02112, doi:10.1029/2008JD010929.

Wu Z H, Huang N E. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 1: 1–41, doi:10.1142/S1793536909000047.

Xia J J, Tu K, Yan Z W, et al. 2016. The super-heat wave in eastern China during July–August 2013: A perspective of climate change [J]. International Journal of Climatology, 36: 1291–1298, doi:10.1002/joc.4424.

Xiao D P, Tao F L, Liu Y J, et al. 2013. Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981–2009 [J]. International Journal of Biometeorology, 57: 275–285, doi:10.1007/s00484-012- 0552- 8.

徐家良. 1993. 近百余年上海气温变化的若干特征 [J]. 地理学报, 48: 26–32. Xu Jialiang. 1993. Some features of temperature variations in Shanghai for the 118 year period [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 48: 26–32, doi:10.11821/xb199301004.

Yan Z W, Yang C, Jones P. 2001. Influence of inhomogeneity on the estimation of mean and extreme temperature trends in Beijing and Shanghai [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18: 309–322, doi:10.1007/BF02919312.

严中伟, 李珍, 夏江江. 2014. 气候序列的均一化——定量评估气候变化的基础 [J]. 中国科学: 地球科学, 44: 2101–2111. Yan Zhongwei, Li Zhen, Xia Jiangjiang. 2014. Homogenization of climate series: The basis for assessing climate changes [J]. Science China Earth Sciences, 57: 2891–2900, doi:10.1007/s11430-014-4945-x.

周伟东, 朱洁华, 梁萍. 2010. 近 134 年上海冬季气温变化特征及其可能成因 [J]. 热带气象学报, 26: 211–217. Zhou Weidong, Zhu Jiehua, Liang Ping. 2010. Characteristics of winter temperature variation in Shanghai during 1873–2006 and their probable causes [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 26: 211–217, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.02.011.