艾雅雯, 孙建奇, 韩双泽, 等. 2020. 1961～2016 年中国春季极端低温事件的时空特征分析 [J]. 大气科学, 44(6): 1305−1319. AI Yawen, SUN Jianqi, HAN Shuangze, et al. 2020. Spatial and Temporal Features of Spring Extreme Low Temperature Events in China during 1961–2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1305−1319. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19223

1961～2016 年中国春季极端低温事件的时空特征分析

艾雅雯[1] 孙建奇[2] 韩双泽[2] 张梦琪[2] 华维[1,2]

1 成都信息工程大学大气科学学院，成都 610225
2 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心，北京 100029

摘 要 利用 1961～2016 年中国 529 个台站逐日最低气温资料，研究了中国春季极端低温事件的时空变异特征。旋转经验正交分解结果显示，中国春季极端低温事件的频次在空间上可以分为 5 个区域，即东北—华北东部地区、江南地区、西北东部—华北西部地区、西南地区和新疆北部地区。小波分析表明，这 5 个区域春季极端低温事件的频次在年际尺度上呈现出 2～4 年的振荡周期，其中江南地区、西北东部—华北西部地区和新疆北部地区 2～4 年的振荡周期在整个研究时段都显著，但东北—华北东部地区和西南地区 2～4 年的显著周期分别出现在 20 世纪 80 年代之前和 80 年代到 90 年代中期。在长期变化上，这 5 个区域春季极端低温事件的频次总体均呈减少趋势，但突变年份具有明显差异。Mann-Kendall 和滑动 *t* 检验结果表明，东北—华北东部地区春季极端低温事件频次的突变时间为 1987/1988 年、江南地区为 1995/1996 年、西北东部—华北西部地区为 1990/1991 年、西南地区为 1987/1988 年、新疆北部地区为 1997/1998 年。伴随着春季极端低温事件频次的降低，5 个区域春季极端低温事件的强度在过去半个多世纪也呈现出显著的下降趋势。但近 10 年来，中国东部地区春季极端低温事件的频次和强度却有所增加，需要引起关注。

关键词 春季极端低温事件 频次 强度
文章编号 1006-9895(2020)06-1305-15 **中图分类号** P467 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19223

Spatial and Temporal Features of Spring Extreme Low Temperature Events in China during 1961–2016

AI Yawen[1], SUN Jianqi[2], HAN Shuangze[2], ZHANG Mengqi[2], and HUA Wei[1,2]

1 *School of Atmosphere Sciences*, *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225
2 *Nansen–Zhu International Research Centre*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

Abstract Based on daily minimum temperature data from 529 stations in China for the period 1961–2016, in this study, we investigated the spatio-temporal features of spring extreme low temperature (ELT) events. The results of our rotated empirical orthogonal function (REOF) analysis indicates that, with respect to the variability of the spring ELT events

收稿日期 2019-09-30；**网络预出版日期** 2020-03-17
作者简介 艾雅雯，女，1994 年出生，硕士研究生，主要从事极端气候方面的研究。E-mail: 2903757775@qq.com
通讯作者 孙建奇，E-mail: sunjq@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41825010，国家重点研发计划 2016YFA0600701
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41825010), National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0600701)

frequency, China can be divided into five regions, including Northeast China–eastern North China, the Jiangnan region, eastern Northwest China–western North China, Southwest China, and northern Xinjiang. The results of our Morlet wavelet analysis indicate that the spring ELT events frequencies over the five regions exhibit a 2–4-year quasi-periodicity. This 2–4-year quasi-periodicity is significant over the whole period for the Jiangnan region, eastern Northwest China–western North China, and northern Xinjiang; over the period prior to the early 1980s for Northeast China–eastern North China; and over the period between early 1980s and mid-1990s for Southwest China. With respect to long-term variation, the spring ELT events frequencies over all five regions exhibit decreasing trends, although the years of their abrupt change differ. The results of our Mann–Kendall analysis and moving t-test suggest that the abrupt change in the spring ELT events frequency occurred in 1987/1988 for Northeast China–eastern North China, 1995/1996 for the Jiangnan region, 1990/1991 for eastern Northwest China–western North China, 1987/1988 for Southwest China, and 1997/1998 for northern Xinjiang. Along with the decreasing spring ELT events frequency, the spring ELT events intensities have weakened in the five regions in the past half century. However, in the past 10 years, the spring ELT events frequency and intensity over eastern China have increased, which merits concern.

Keywords Spring extreme low temperature, Frequency, Intensity

1 引言

中国位于东亚地区，东临太平洋，西靠欧亚大陆，具有青藏高原等复杂地形，特殊的地理位置和地形地貌特点使得东亚地区的气候变异较为复杂，极端天气气候事件频繁发生。同时，中国也是世界上人口分布最稠密的地区之一，极端天气气候事件可以给该地区的生态、社会、经济等方面带来严重影响（罗云峰, 2002; 吴绍洪和尹云鹤, 2012; Sisco et al., 2017）。

在诸多极端事件中，极端低温对社会环境和人们生活具有重要的影响，因而也引起了较多的关注。自 20 世纪 90 年代以来，国内外学者对极端低温事件开展了大量研究。近半个世纪的观测资料分析显示，全球大部分地区的极端最高温度和极端最低温度均在升高，但极端低温的升高幅度大于极端高温，由此导致这些地区冷日（冷夜）日数显著减少、暖日（暖夜）日数显著增加（e.g., Karl et al., 1991; Manton et al., 2001; Griffiths et al., 2005; Alexander et al., 2006; Brown et al., 2008; Grotjahn et al., 2016; Yoo et al., 2019）。部分地区更长时间的资料分析也得到类似的结果。例如，Brabson and Palutikof（2002）分析了 1772～2000 年英国中部的极端温度事件，同样发现该地区冬季极端低温事件的发生频次在持续减少，夏季极端高温事件的发生频次在持续增加。

中国区域的极端低温事件，既表现出与全球类似的减少趋势，也呈现出显著的区域变化特点。就季节变率而言，中国极端低温事件在春、秋两季最大，在夏季最小（任福民和翟盘茂, 1998; 王翠花等, 2003; Liu et al., 2006; 杨萍等, 2010; 赵俊虎等, 2011; 肖冰霜等, 2016）。在长期趋势上，全国大部分地区冬季极端低温事件的减少趋势最为显著，全年各月极端低温的增暖趋势大于极端高温，同时极端温度冷指数（包括冷昼日数、冷夜日数、霜冻日数、冰冻日数等）的减少趋势大于极端温度暖指数（包括暖昼日数、暖夜日数、高温日数等）（江志红等, 1999; 翟盘茂和潘晓华, 2003; 任国玉等, 2005; 杨金虎等, 2006; 周雅清和任国玉, 2010; Xu et al., 2013; You et al., 2013; 谢星旸等, 2018）。此外，刘雅星等（2010）和付冬雪等（2011）的研究进一步发现全国范围内冬季极端低温事件频数在 20 世纪 80 年代中期前后发生了突变；突变后的极端低温事件频数、均值和变率明显低于突变前。在空间分布上，全国范围内极端最低温度普遍升高，极端低温事件频次普遍减少，尤其是东北、华北、青藏高原地区最为显著（严中伟和杨赤, 2000; 马柱国等, 2003; Huang et al., 2010; Zhang et al., 2011; 王晓娟等, 2012; Grotjahn et al., 2016; 武丽梅等, 2016; 高丽等, 2019）。

冬季气温较低，易引发寒潮及冰雪灾害等，之前已有针对中国区域极端低温的研究主要集中在冬季。春季是农作物耕种和生长的关键时期，是冷暖空气频繁交替的季节，因此，春季也是中国极端低温的高发期，但目前针对春季极端低温事件的研究还相对较少。王冀等（2007）及张霏燕和徐海明（2011）关注了中国东北地区春季极端气温的变化，发现过去半个世纪该地区极端低温事件的频数整体

呈减少趋势。Zhu et al.（2018）的研究指出中国华北地区春季极端冷事件（“倒春寒”）从 20 世纪 90 年代之后显著减少。这些已有的少量工作对于认识春季极端低温的变化奠定了一定的科学基础，但还有很多科学问题亟待深入研究。例如，中国春季极端低温事件的空间分布特征如何？如何进行分区？各地区极端低温变化有何异同？

因此，本文将统计分析中国 1961～2016 年春季极端低温事件时空分布特征，并利用旋转经验正交分解（REOF）方法进行分区，在此基础上对比分析不同特征区域春季极端低温事件的变化特征。

2　资料和方法

本文利用的观测资料来自于中国气象局发布的 829 个台站逐日最低气温资料。这 829 个台站中，有 529 个在 1961～2016 年的春季（3、4、5 月）无缺测，因此本文利用这 529 个台站的资料开展研究。

本文采用百分位法定义春季极端低温事件。这里以北京站 4 月 15 日为例，来具体说明计算过程。首先，以 4 月 15 日为中心选择每年 4 月 13～17 日的最低气温组成 5 日×56 年（研究时段为 1961～2016 年）的时间序列；然后，将该时间序列按照升序排列，将排列后序列的第 10 百分位值定义为该站该日极端低温的阈值，第 10 百分位值的确定采用 Bonsal et al.（2001）的非参数化方案，公式如下：

$$P=\frac{(M-0.31)}{(N+0.38)}, \tag{1}$$

其中，P 为概率，本文选取第 10 百分位，因此 P 为 0.1；N 为某气象变量的个数，本文中变量个数为 5×56；M 为序列的序号。根据公式可求得 M 为 28.348，为了更准确地获得阈值，本文选择了序列中序号为 28 和 29 的最低温度平均值作为北京站 4 月 15 日极端低温的阈值；最后，用该站 1961～2016 年 4 月 15 日逐日最低温度与该站该日极端低温阈值进行比较，如果某日最低气温低于阈值，则认为该站该日发生了一次极端低温事件。根据上述过程，可以依次统计出全国 529 个台站逐年春季的极端低温事件发生频次。极端低温事件强度定义为极端低温日最低温度与阈值的差值，差值越小表示强度越大，反之则越小。

在分析中国春季极端低温事件的时空特征时，本文用到了旋转经验正交分解（REOF）、Mann-Kendall 检验和滑动 t（MTT）检验、概率密度函数分析（PDF）、Morlet 小波分析等方法。

3　中国春季极端低温事件的定义阈值和频次的空间分布特征

图 1a 为中国春季极端低温事件定义阈值的空间分布。由图可见，极端低温事件的定义阈值呈现出明显的南北分布差异，北方大部分地区为负值，南方大部分地区为正值。极端低温事件的定义阈值在 100°E 以东地区呈现出由南向北递减的特征。阈值低值区主要位于青藏高原东部、新疆北部和东北北部地区，平均阈值在−10°C 以下；高值区位于华南（25°N 以南）地区，平均阈值在 10°C 以上。按照百分位法定义的极端低温事件空间差异相对较小，如图 1b 所示，全国大部分区域气候态平均的极端低温事件频次在 9 a^{-1} 左右。相对的大值区位于东北、华北北部、新疆北部、西南东部及长江中下游等地，年平均频次在 9.3 次以上。

图 1c 为中国春季极端低温事件频次标准差的空间分布。标准差的大值区主要位于东北、华北、新疆北部、云南和淮河流域，尤其是东北和云南地区，其极端低温事件频次的变率甚至和该地极端低温事件频次的气候平均值相当，表明这些地区极端低温事件频次具有很强的年际变率；相对而言，标准差比较小的地区位于华南地区（25°N 以南），该地区极端低温事件频次的标准差小于其气候平均值的一半。

中国地域辽阔，为了比较客观地对春季极端低温事件变异进行空间区划，本文采用了 REOF 方法开展了相关研究。REOF 前 5 个模态共解释了总方差的 63.1%，依据该结果（图 2），中国春季极端低温事件频次在空间上可以分为 5 个区域，分别为东北—华北东部地区（32°～54°N，113°～135°E）、江南地区（18°～31.5°N，102°～122°E）、西北东部—华北西部地区（34°～42°N，96.5°～112.5°E）、西南地区（21°～33°N，78.5°～102°E）和新疆北部地区（40°～50°N，80°～95°E）。图 3 为这 5 个区域平均的极端低温事件频次时间序列，可以看出这 5 个区域的极端低温事件频次呈现出较强的年际和年代际变化特征，后续我们将针对这两点开展研究，对比分析不同区域的异同点。

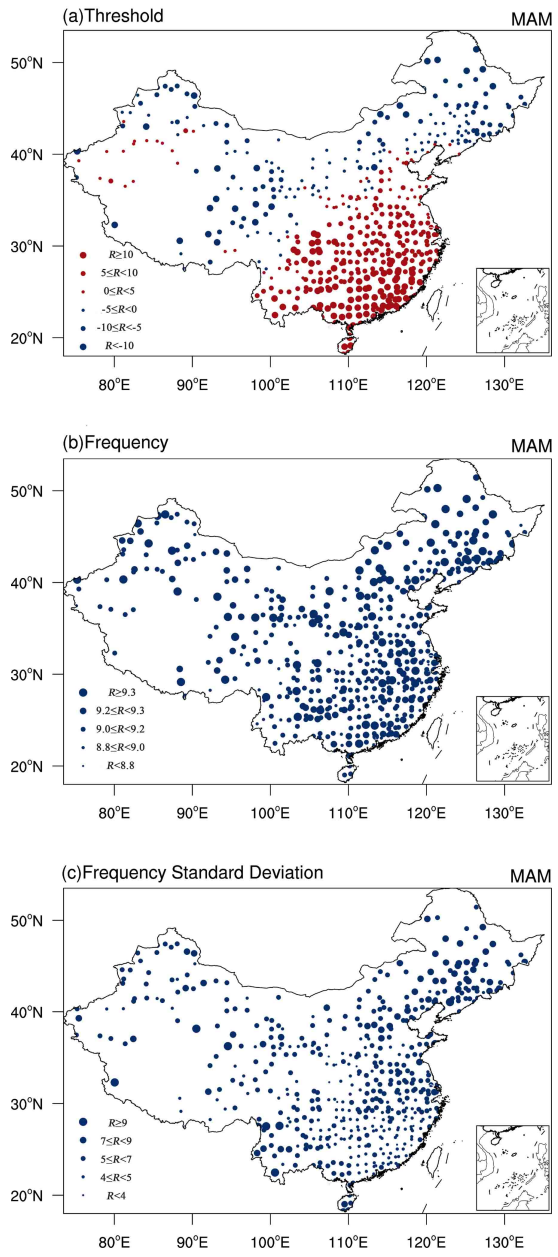

图 1 1961～2016 年中国春季极端低温事件（a）定义阈值（温度阈值，单位：℃）、（b）频次（单位：a^{-1}）及（c）频次的标准差（单位：a^{-1}）分布。*R* 表示图中物理量的值，下同

Fig. 1 Distribution of (a) threshold (temperature threshold, units: °C), (b) frequency (units: a^{-1}), and (c) standard deviation (units: a^{-1}) of spring extreme low temperature events during 1961–2016 in China. *R* represents the value of the variables in the figure, the same below

4 中国春季极端低温事件频次的年际变异周期

Morlet 小波分析是对变量时域和频域相结合的分析方法，可以反映出变量的周期波动特征（Chen et al., 2012; 黄嘉佑和李庆祥, 2015）。图 4 为中国 5 个区域春季极端低温事件频次的 Morlet 小波分析结果。对于东北—华北东部地区，极端低温事件频次存在 2～4 年的振荡周期，在功率谱图中该周期是显著的；进一步分析表明，东北—华北东部地区极端低温事件频次 2～4 年的振荡周期在 20 世纪 80 年代中期之前可以通过 95% 的显著性检验，而在这之后其显著性变弱。

江南地区和新疆北部地区极端低温事件频次在整个分析时段几乎都呈较为强的 2～4 年振荡周期，而且该周期性能通过 95% 的信度检验。西北东部—华北西部地区极端低温事件频次整体上也具有 2～4 年的振荡周期，但在 20 世纪 60～70 年代其显著振荡周期为 2～8 年，之后其振荡周期基本维持在 2～4 年。

相对而言，西南地区极端低温事件频次的周期性要弱一些，该地区没有显著的振荡主周期，只有在 20 世纪 60 年代后期和 80 年代到 90 年代中期存在显著的 2～4 年振荡周期，在其他时段其周期性并不显著。

上述分析表明，中国江南地区、西北东部—华北西部地区和新疆北部地区春季极端低温事件频次具有显著的 2～4 年振荡周期；东北—华北东部地区极端低温事件频次周期性较弱，其显著的 2～4 年的振荡周期只出现在 20 世纪 80 年代中期之前；西南地区极端低温事件频次的周期性最弱，除了 20 世纪 60 年代末和 80 年代到 90 年代中期，在过去半个世纪的大部分时间中，该地区极端低温事件频次的变化没有显著的主振荡周期。

5 中国春季极端低温事件频次的年代际变化

上述各地区春季极端低温事件频次除了具有明显的年际振荡周期外，还具有很强的趋势变化（图 3）。但不同区域之间极端低温事件频次的突变时间明显不同。我们首先利用 MK 方法来检验这 5 个区域极端低温事件频次的突变时间。如图 5 所示，东北—华北东部地区极端低温事件频次的突变时间为 1987/1988 年，江南地区为 1995/1996 年，西北东部—华北西部地区为 1990/1991 年，西南地区为 1987/1988 年，新疆北部地区为 1997/1998 年。在突变之前，这些地区的极端低温事件频次都偏多，突变之后显著偏少。

为进一步佐证上述突变检验结果，我们还对上述 5 个区域的极端低温事件频次进行了 MTT 检验。如表 1 所示，东北—华北东部地区、江南地区和西北东部—华北西部地区 MTT 的突变检验时间与 MK 检验时间一致，且通过了 99% 的信度检验。西南地区和新疆北部地区的突变年时间也与 MK 检验时间一致，并通过了 95% 的信度检验。结合 MK 检验和 MTT 检验的结果可以得到结论：在 1961～2016 年期间，中国范围内 5 个区域的春季极端低温事件频次均呈减少趋势，但各区域的突变

表 1　MTT 检验得出的 5 个区域春季极端低温事件频次突变年

Table 1　Abrupt change years of frequencies of spring extreme low temperature events in the five regions, as detected by the MTT

区域	突变年
东北—华北东部地区（32°～54°N，113°～135°E）	1987/1988***
江南地区（18°～31.5°N，102°～122°E）	1995/1996***
西北东部—华北西部地区（34°～42°N，96.5°～112.5°E）	1990/1991***
西南地区（21°～33°N，78.5°～102°E）	1987/1988**
新疆北部地区（40°～50°N，80°～95°E）	1997/1998**

、*分别是通过95%和99%的MTT检验

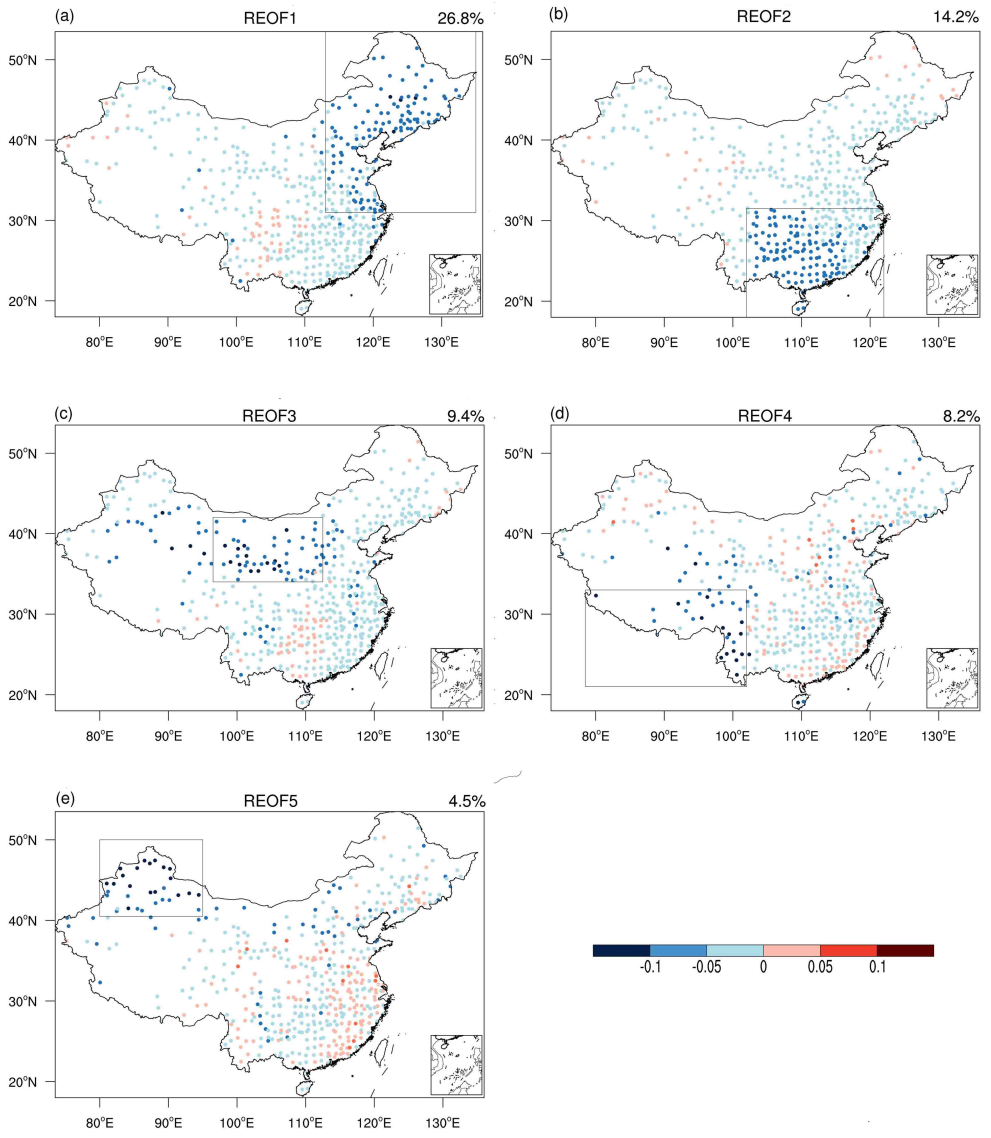

图 2　中国春季极端低温事件频次 REOF 前五个模态。（a）、（b）、（c）、（d）和（e）矩形分别代表东北—华北东部地区、江南地区、西北东部—华北西部地区、西南地区和新疆北部地区

Fig. 2　First five REOF modes for frequencies of spring extreme low temperature events. The rectangles in (a), (b), (c), (d), and (e) represent Northeast China–eastern North China, the Jiangnan region, eastern Northwest China–western North China, Southwest China, and northern Xinjiang, respectively

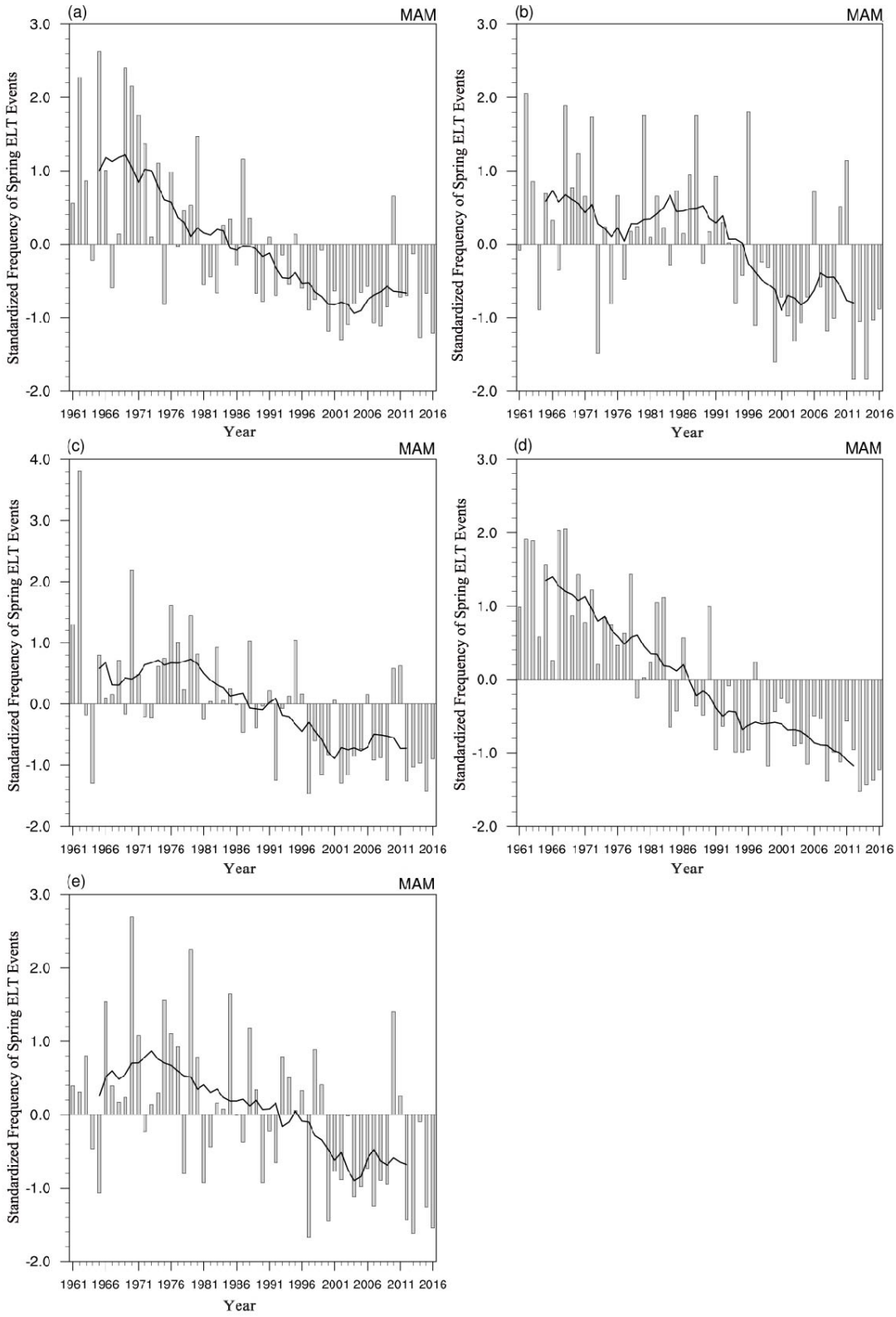

图 3　5 个区域平均的标准化春季极端低温事件频次序列（柱状）及其 9 年滑动平均（曲线）。（a）、（b）、（c）、（d）和（e）分别代表东北—华北东部地区、江南地区、西北东部—华北西部地区、西南地区和新疆北部地区

Fig. 3　The time series of standardized frequencies of spring extreme low temperature（ELT）events averaged in the five regions (gray bars) and their 9-year moving-average values (curve). (a), (b), (c), (d), and (e) represent Northeast China–eastern North China, the Jiangnan region, eastern Northwest China–western North China, Southwest China, and northern Xinjiang, respectively

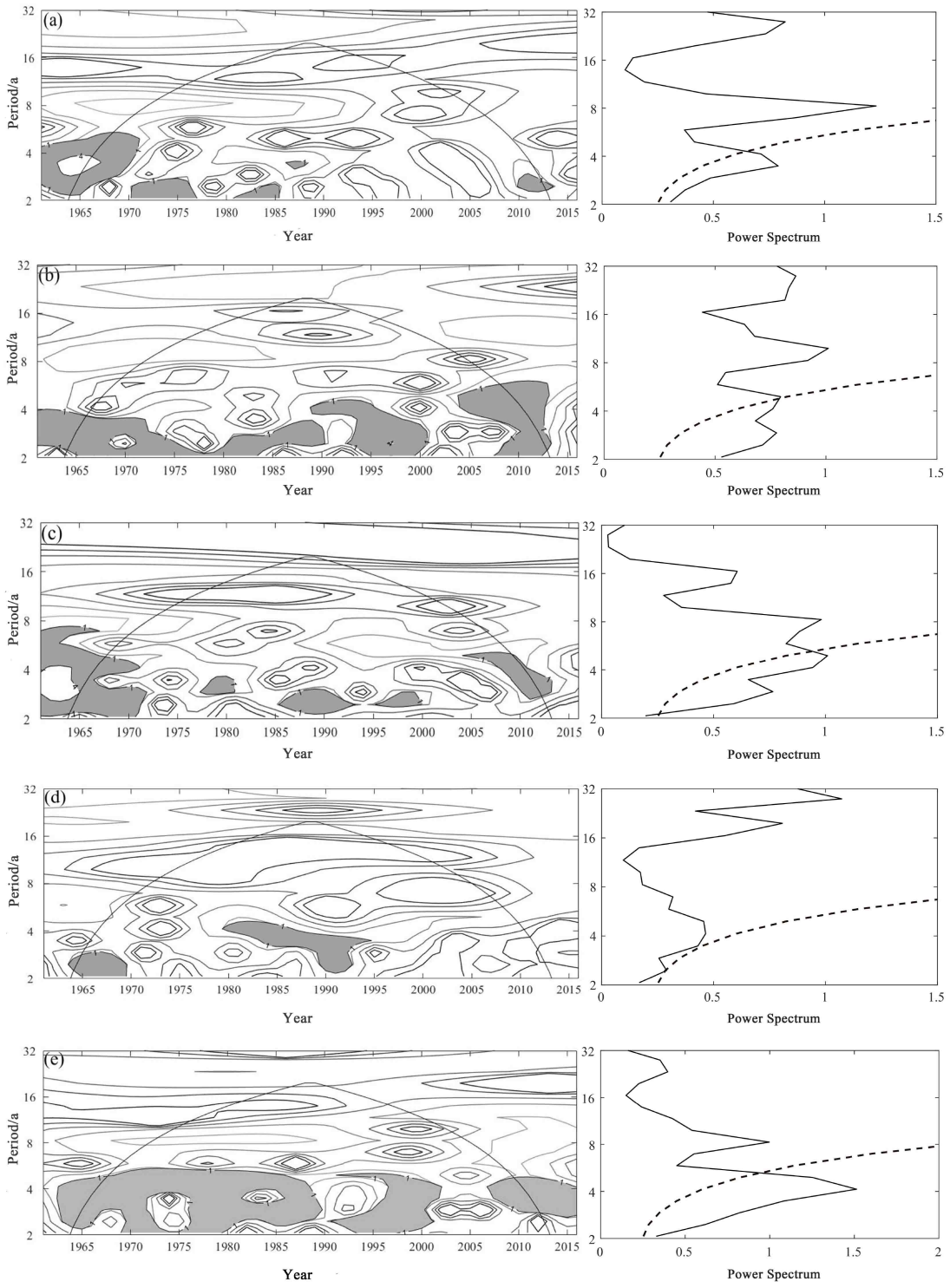

图 4　5 个区域春季极端低温事件频次时间序列的 Morlet 小波图。左图为小波功率谱（等值线），填色区通过 95% 信度检验，黑色弧线为小波边界；右图为各周期波谱，虚线代表 95% 的红噪音信度检验。（a）、（b）、（c）、（d）和（e）分别代表东北—华北东部地区、江南地区、西北东部—华北西部地区、西南地区和新疆北部地区

Fig. 4　Morlet wavelet of frequencies of spring extreme low temperature events in the five regions. The left column is wavelet power spectrum (contour), shaded areas in the left column indicate anomalies that meet the 95% confidence level, the black arc is the wavelet boundary; the right column is wavelet power spectrum of each period, dashed lines indicate the 95% confidence level using a red-noise background spectrum. (a), (b), (c), (d), and (e) represent Northeast China–eastern North China, the Jiangnan region, eastern Northwest China–western North China, Southwest China, and northern Xinjiang, respectively

时间有所不同，其中东北—华北东部地区和西南地区相对较早为 1987/1988 年；西北东部—华北西部地区次之为 1990/1991 年；江南地区和新疆北部地区最晚，分别为 1995/1996 年和 1997/1998 年。

为分析春季极端低温事件的年代际变化特征，图 6 给出了各区域春季平均最低温度在突变前后的概率密度函数（PDF）分布。可以看到，5 个区域春季平均最低温度在突变后均明显高于突变前；同

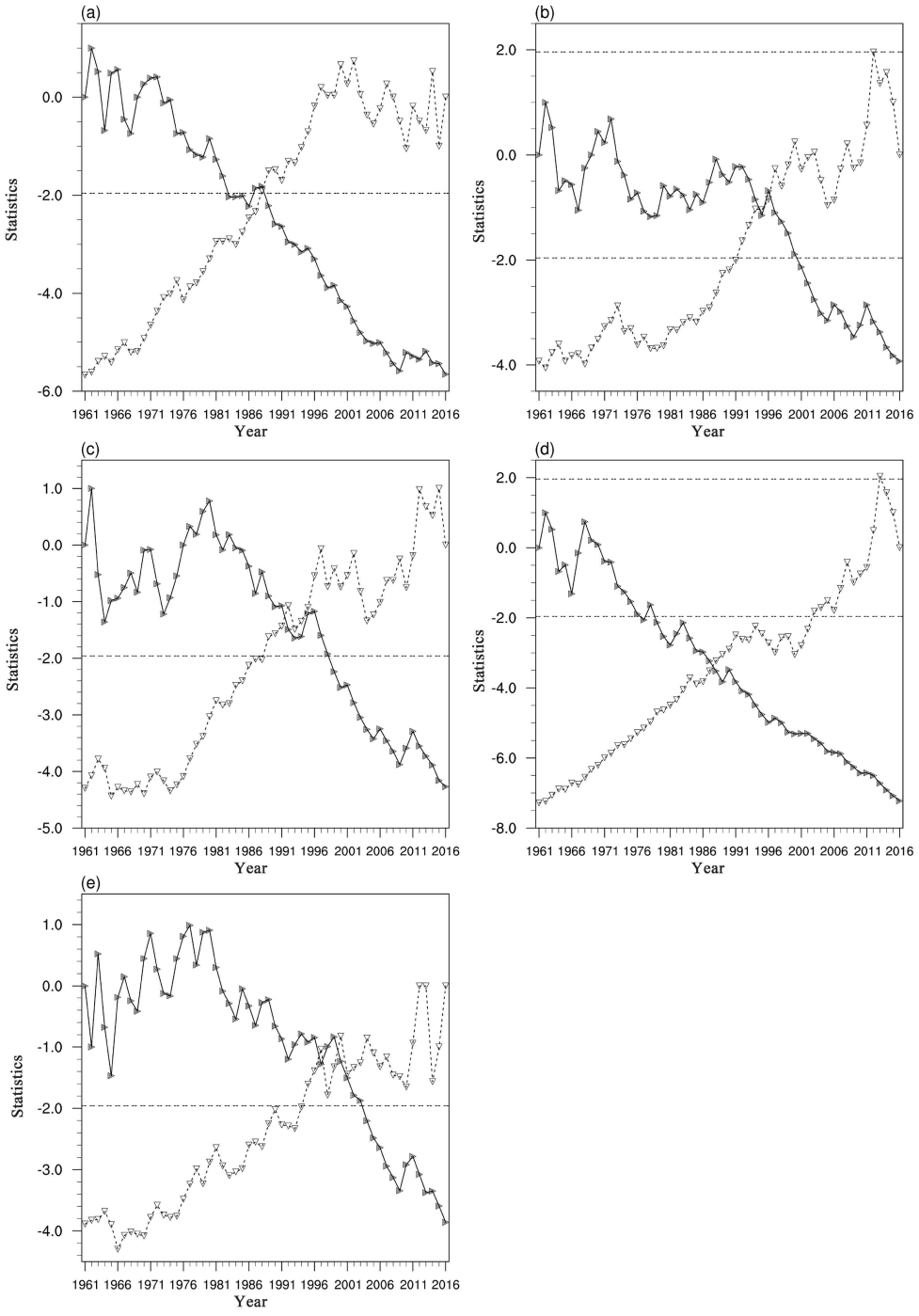

图 5　5 个区域春季极端低温事件频次时间序列的 MK 检验（黑色实线代表 UF 线，黑色虚线代表 UB 线，y=±1.96 虚线代表 95% 信度检验线）。（a）、（b）、（c）、（d）和（e）分别代表东北—华北东部地区、江南地区、西北东部—华北西部地区、西南地区和新疆北部地区

Fig. 5　MK test of frequencies of spring extreme low temperature events in the five regions (black solid line indicates the UF line, black dashed line is the UB line, y=±1.96 dashed lines indicate lines at the 95% confidence level). (a), (b), (c), (d), and (e) represent Northeast China–eastern North China, the Jiangnan region, eastern Northwest China–western North China, Southwest China, and northern Xinjiang, respectively

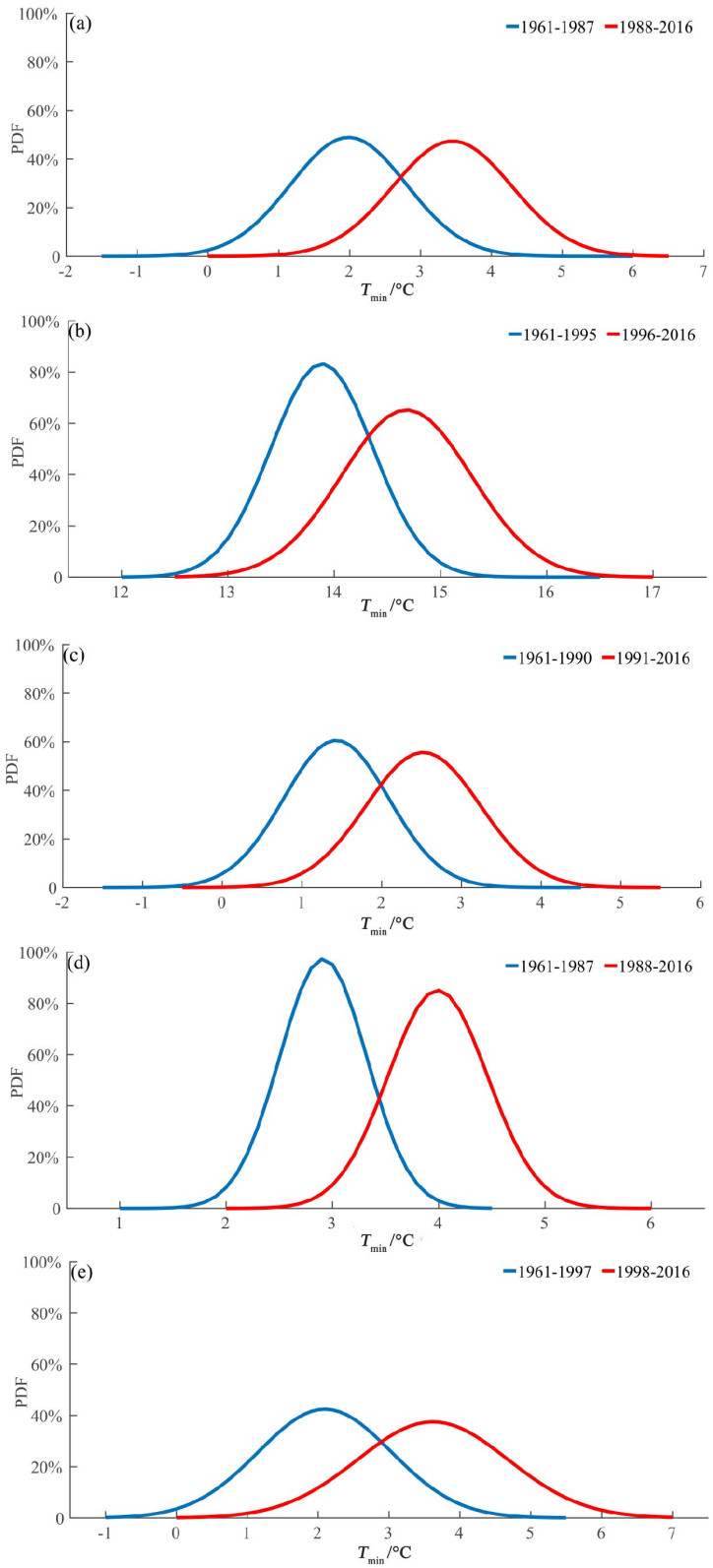

图 6　5 个区域两个时段春季最低温度的概率密度函数（PDF）分析。（a）、（b）、（c）、（d）和（e）分别代表东北—华北东部地区、江南地区、西北东部—华北西部地区、西南地区和新疆北部地区

Fig. 6　Probability Density Functions (PDFs) of spring minimum temperature in the five regions for two different decadal backgrounds. (a), (b), (c), (d), and (e) represent Northeast China–eastern North China, the Jiangnan region, eastern Northwest China–western North China, Southwest China, and northern Xinjiang, respectively

时各区域春季平均最低温度的标准差也在突变后有所增加。对于东北—华北东部地区，春季平均最低温度从突变前（1961～1987 年）的 1.98°C 增加至突变后（1988～2016 年）的 3.45°C，平均最低温度标准差由 0.80°C 增加至 0.83°C。江南地区的平均最低温度由突变前（1961～1995 年）的 13.89°C 增加为突变后（1996～2016 年）的 14.68°C，平均最低温度标准差由 0.47°C 增加为 0.59°C。西北东部—华北西部地区的平均最低温度从突变前（1961～1990 年）的 1.43°C 增加至突变后（1991～2016 年）的 2.52°C，平均最低温度标准差由 0.65°C 增加至 0.70°C。西南地区的平均最低温度由突变前（1961～1987 年）的 2.85°C 增加至突变后（1988～2016 年）的 3.90°C，平均最低温度标准差由 0.35°C 增加至 0.50°C。新疆北部地区的平均最低温度从突变前（1961～1997 年）的 2.00°C 增加至突变后（1998～2016 年）的 3.62°C，平均最低温度标准差由 0.93°C 增加至 1.03°C。

概率密度函数分布结果表明，5 个区域的春季平均最低温度均具有明显的增暖特征，这与春季极端低温事件频次的年代际减少密切相关。我们进一步考察了各区域春季平均最低温度与该区域春季极端低温事件频次的关系。结果表明，在 1961～2016 年期间，二者的相关系数分别为：−0.93（东北—华北东部地区）、−0.83（江南地区）、−0.92（西北东部—华北西部地区）、−0.94（西南地区）和−0.90（新疆北部地区），这些相关系数均可通过 99% 的信度检验。因此，春季极端低温事件频次与春季平均最低温度的变化存在密切联系（Lee et al., 2013; Yoo et al., 2019）。

6 中国春季极端低温事件的强度特征分析

本文进一步对中国春季极端低温事件的强度进行了分析。图 7a 为中国春季极端低温事件强度的空间分布。由图可知，极端低温事件强度呈现出明显的南北差异，北方地区强度强于南方地区。强度大值区位于新疆北部、华北北部及东北地区，平均强度在−5°C 以下；小值区位于西南地区，平均强度在−4°C 以上。图 7b 为中国春季极端低温事件强度标准差的空间分布。标准差的大值区主要位于 35°N 以北地区，尤其是新疆北部及东北地区，极端低温事件强度的变率与该地区极端低温事件强度的气候平均值相当，表明这些地区极端低温事件强度的年际变率很强；35°N 以南地区强度标准差相对较小，极端低温事件强度的变率小于该地区极端低温事件强度气候平均值的一半。极端低温事件强度 REOF 结果与极端低温事件频次的分解结果相似，表明中国春季极端低温事件强度在空间上同样可以分为 5 个区域（图略）。同时，这 5 个区域春季极端低温事件强度 Morlet 小波分析结果也与极端低温事件频次的小波结果相似，表明这 5 个区域极端低温事件强度在年际尺度上也呈现出 2～4 年的振荡周期（图略）。

图 8 为 5 个区域极端低温事件强度的时间序列，可以看到，这 5 个区域的极端低温事件强度均呈现明显的变弱趋势，这和极端低温事件频次的减少相一致。这意味着随着全球变暖，过去半个世纪，中国东部春季极端低温事件显著减少，且其强度明显降低。

7 小结及讨论

本文利用 1961～2016 年中国春季 529 个无缺测台站的逐日最低气温资料，研究了中国春季极端低温事件的时空变异特征。结果显示，中国春季极端低温事件的定义阈值和频次及其变率均呈现出明显的空间分布差异。通过对中国春季极端低温事件频次进行旋转经验正交分解，可以将中国春季极端低温事件频次变化较为客观地分为 5 个区域，分别为东北—华北东部地区、江南地区、西北东部—华北西部地区、西南地区和新疆北部地区。这 5 个区域极端低温事件频次具有明显的年际和年代际特征。在年际变化上，5 个区域极端低温事件频次均呈现出 2～4 年的振荡周期，其中江南地区、西北东部—华北东部地区和新疆北部地区 2～4 年的振荡周期在整个研究时段都显著，东北—华北东部在 20 世纪 80 年代之前有 2～4 年的显著周期，西南地区 2～4 年的显著周期出现在 20 世纪 60 年代末和 80 年代到 90 年代中期。在长期变化上，5 个区域春季极端低温事件的频次总体均呈减少趋势，但突变年份有明显差异，其中东北—华北东部地区极端低温事件频次的突变时间为 1987/1988 年，江南地区为 1995/1996 年，西北东部—华北西部地区为 1990/1991 年，西南地区为 1987/1988 年，新疆北部地区为 1997/1998 年。概率密度函数分析结果表

明，5 个区域春季平均最低温度和春季平均最低温度的标准差在突变后均明显高于突变前，进一步说明 5 个区域的春季平均最低温度在突变后均有明显的增暖特征，这与春季极端低温事件频次在突变后的显著减少密切相关。中国春季极端低温事件强度同样呈现出与频次相似的变化特征。

虽然在过去半个多世纪，中国春季极端低温事件的频次和强度都呈现出显著的下降趋势，但是从图 3 和图 8 中还是可以看到近 10 年来有些区域极端低温事件的频次和强度有所恢复。为了进一步探究春季极端低温事件频次和强度在近 10 年的变化，我们计算了近 10 年（2007～2016 年）与之前 10 年（1997～2006 年）极端低温事件频次和强度的十年际差值。如图 9 所示，极端低温事件的频次和强

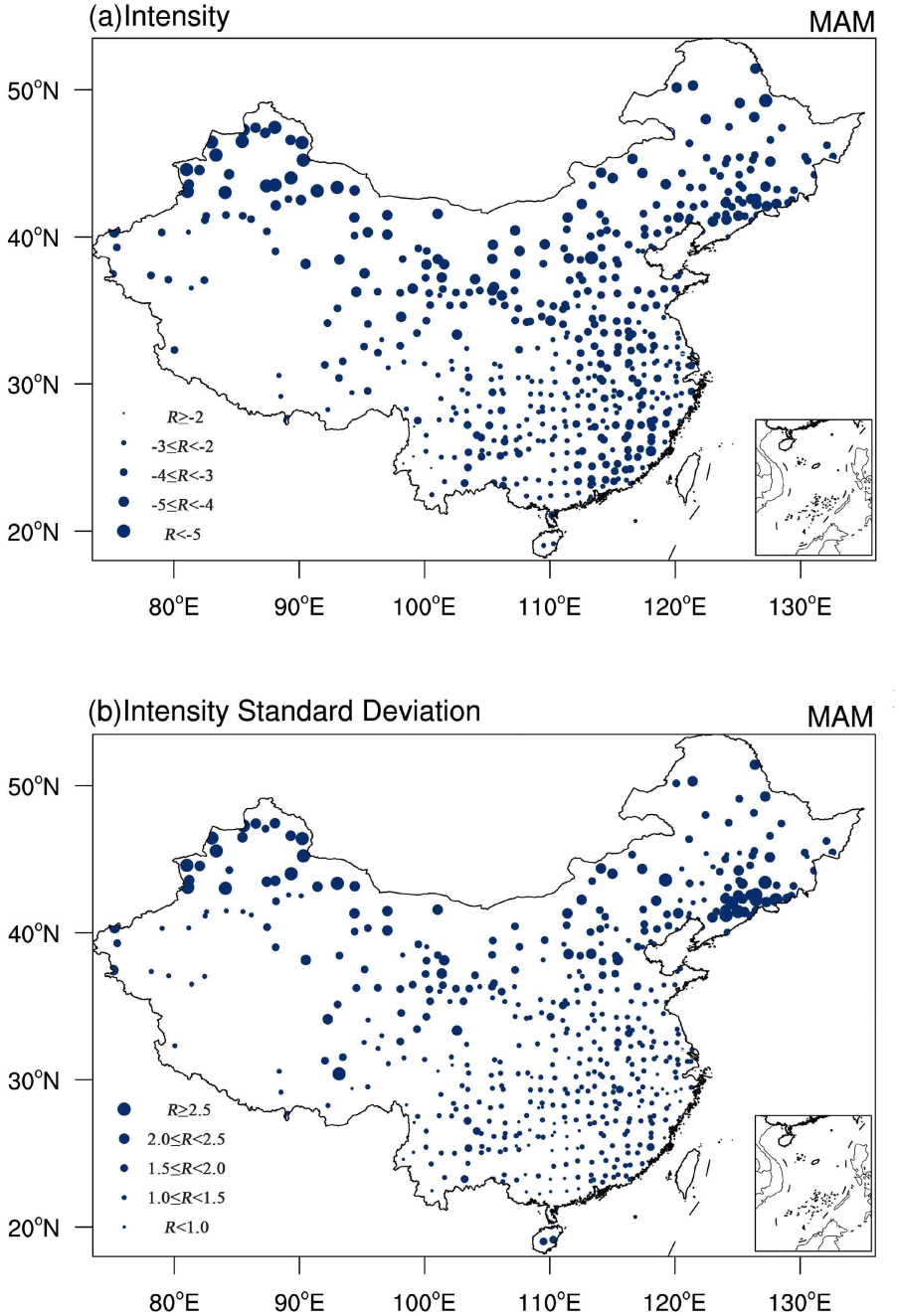

图 7　1961～2016 年中国春季极端低温事件（a）强度（单位：°C）及（b）强度的标准差（单位：°C）分布

Fig. 7　Distributions of (a) intensity (units: °C) and (b) standard deviation (units: °C) of spring extreme low temperature events during 1961–2016 in China

度变化有明显的东西差异。其中，115°E 以西大部分地区频次仍然以减少为主，尤其是青藏高原地区，平均减少 5 次以上；115°E 以东沿海地区频次明显增加，尤其是东北东南部、华北东部及长江流域下游地区，平均增加 5 次以上（图 9a）。与频次的变化相似，极端低温事件的强度差值也具有明显的东西差异，115°E 以西大部分地区强度仍然以减弱为主，尤其是新疆西部及青藏高原地区，强度减少

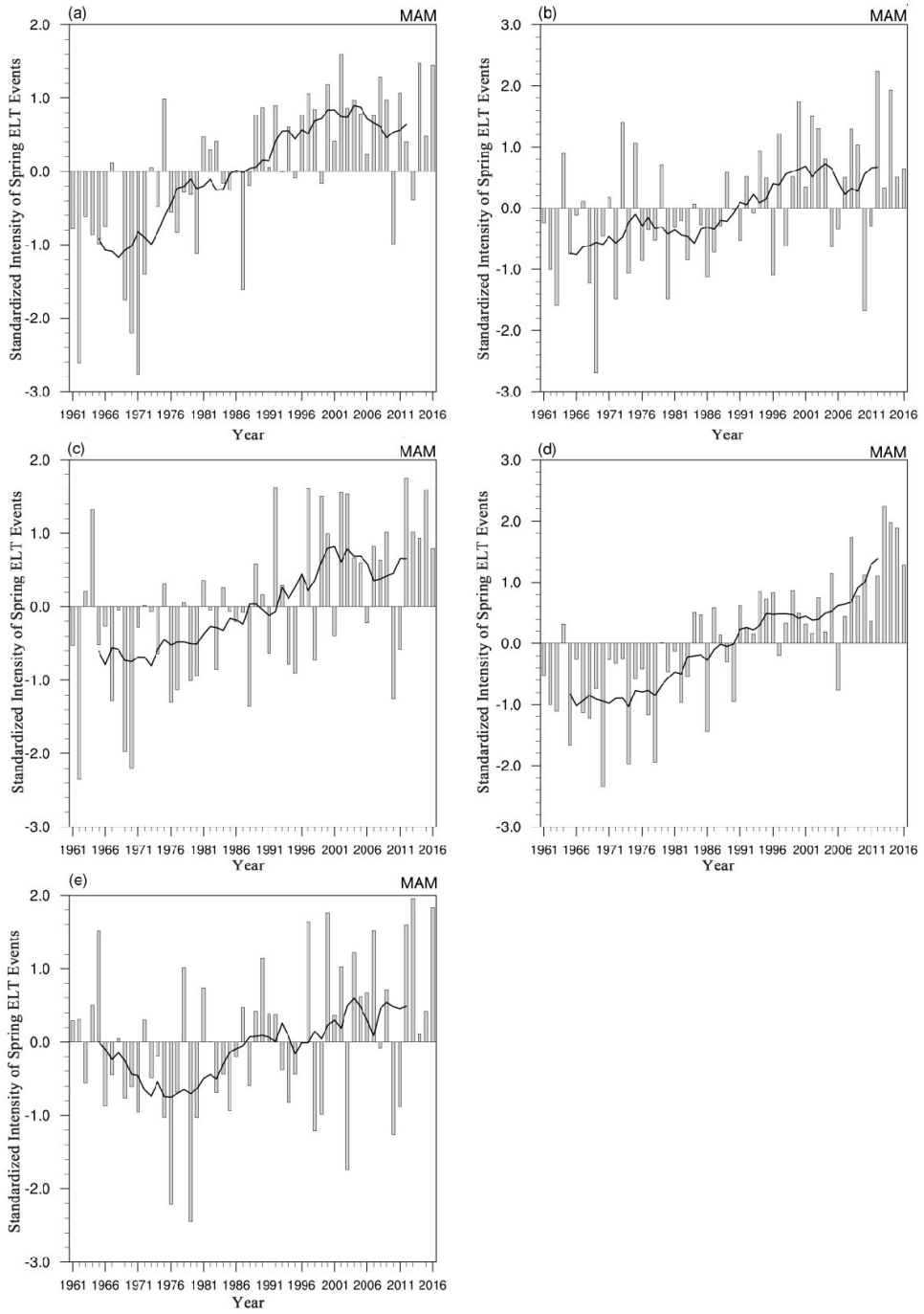

图 8　5 个区域平均的标准化春季极端低温事件强度的时间序列（柱状）及其 9 年滑动平均（曲线）。（a）、（b）、（c）、（d）和（e）分别代表东北—华北东部地区、江南地区、西北东部—华北西部地区、西南地区和新疆北部地区

Fig. 8　The time series of standardized intensities of spring extreme low temperature (ELT) events averaged in the five regions (gray bars) and their 9-year moving-average values (curve). (a), (b), (c), (d), and (e) represent Northeast China–eastern North China, the Jiangnan region, eastern Northwest China–western North China, Southwest China, and northern Xinjiang, respectively

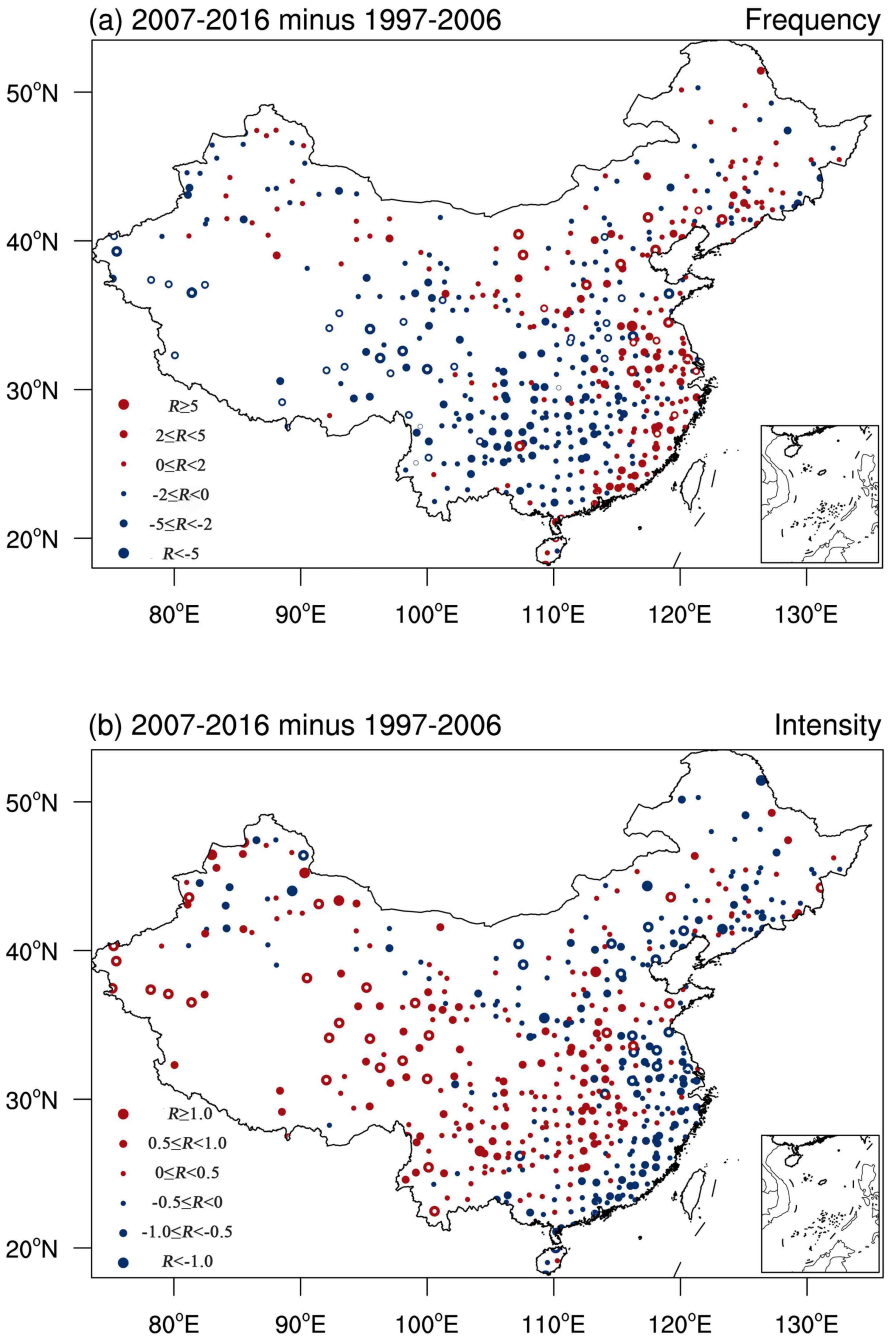

图 9　2007～2016 年与 1997～2006 年（a）春季极端低温事件频次的差值（单位：a^{-1}），（b）春季极端低温事件强度的差值（单位：°C）。白色圆圈为通过 95% 信度检验站点

Fig. 9　Differences in (a) frequency of spring extreme low temperature events (units: a^{-1}) and (b) intensity of spring extreme low temperature events (units: °C) between 2007–2016 and 1997–2006. White circles indicate stations that meet the 95% confidence level

平均为 1°C 以上；115°E 以东沿海地区强度差值出现较多负值，尤其是东北南部、华北东部及长江下游地区，平均增加 1°C 以上（图 9b）。由上述分析可以发现，近 10 年来，中国东部地区（115°E 以东地区）春季极端低温事件的频次和强度有所增加，115°E 以西地区极端低温事件的频次和强度持续减弱，这些事件是近些年造成中国东部地区春害的重要原因，值得进一步关注。

参考文献（References）

Alexander L V, Zhang X B, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation

[J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 111(D5): D05109. doi:10.1029/2005JD006290

Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada [J]. J. Climate, 14(9): 1959−1976. doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1959:codaet>2.0.co;2

Brabson B B, Palutikof J P. 2002. The evolution of extreme temperatures in the Central England temperature record [J]. Geophys. Res. Lett., 29(24): 2163. doi:10.1029/2002GL015964

Brown S J, Caesar J, Ferro C A T. 2008. Global changes in extreme daily temperature since 1950 [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 113(D5): D05115. doi:10.1029/2006JD008091

Chen H P, Sun J Q, Fan K. 2012. Decadal features of heavy rainfall events in eastern China [J]. Acta Meteor. Sinica, 26(3): 289−303. doi:10.1007/s13351-012-0303-0

付冬雪, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2011. 1955～2006 冬半年中国极端低温的时空变化特征 [J]. 气象科学, 31(3): 274−281. Fu D X, Sun Z B, Li Z X, et al. 2011. Spatial and temporal features of China extreme minimum temperature in winter half year during 1955–2006 [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 31(3): 274−281. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2011.03.005

高丽, 任宏利, 郑嘉雯, 等. 2019. 基于 NCEP-GEFS 回算资料的我国极端温度变化特征研究 [J]. 大气科学学报, 42(1): 58−67. Gao L, Ren H L, Zheng J W, et al. 2019. Diagnosis features of extreme temperature variations in China based on the NCEP-GEFS reforecasts [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(1): 58−67. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180911001

Griffiths G M, Chambers L E, Haylock M R, et al. 2005. Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia–Pacific region [J]. Int. J. Climatol., 25(10): 1301−1330. doi:10.1002/joc.1194

Grotjahn R, Black R, Leung R, et al. 2016. North American extreme temperature events and related large scale meteorological patterns: A review of statistical methods, dynamics, modeling, and trends [J]. Climate Dyn., 46(3–4): 1151−1184. doi:10.1007/s00382-015-2638-6

黄嘉佑, 李庆祥. 2015. 气象数据统计分析方法 [M]. 北京: 气象出版社, 457–459. Huang J Y, Li Q X. 2015. Meteorological Data Statistical Analysis Method (in Chinese)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 457–459.

Huang D Q, Qian Y F, Zhu J. 2010. Trends of temperature extremes in China and their relationship with global temperature anomalies [J]. Adv. Atmos. Sci., 27(4): 937−946. doi:10.1007/s00376-009-9085-4

江志红, 丁裕国, 屠其璞. 1999. 中国近 50 年冬夏季极端气温场的年代际空间型态及其演变特征研究 [J]. 应用气象学报, 10(S1): 97−103. Jiang Z H, Ding Y G, Tu Q P. 1999. Interdecadal spatial structure and evolution of extreme temperatures in winter and summer over China during the past 50 years [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 10(S1): 97−103. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.1999.z1.012

Karl T R, Kukla G, Razuvayev V N, et al. 1991. Global warming: Evidence for asymmetric diurnal temperature change [J]. Geophys. Res. Lett., 18(12): 2253−2256. doi:10.1029/91gl02900

Lee S S, Kim S H, Jhun J G, et al. 2013. Robust warming over East Asia during the boreal winter monsoon and its possible causes [J]. Environmental Research Letters, 8(3): 034001. doi:10.1088/1748-9326/8/3/034001

Liu X D, Yin Z Y, Shao X M, et al. 2006. Temporal trends and variability of daily maximum and minimum, extreme temperature events, and growing season length over the eastern and central Tibetan Plateau during 1961–2003 [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 111(D19): D19109. doi:10.1029/2005JD006915

刘雅星, 范广洲, 董一平, 等. 2010. 近 46 年中国冬季日均气温及极端温度的变化 [J]. 成都信息工程学院学报, 25(3): 286−292. Liu Y X, Fan G Z, Dong Y P, et al. 2010. Variations of winter daily average temperature and extreme temperature in the recently 46 years in China [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 25(3): 286−292. doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2010.03.012

罗云峰. 2002. 降低对天气和气候极端事件的脆弱性——2002 年“世界气象日”主题 [J]. 中国科学基金, 16(5): 279−283. Luo Y F. 2002. "Reducing vulnerability to weather and climate extremes"——The theme of 2002 world meteorological day [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China(in Chinese), 16(5): 279−283. doi:10.3969/j.issn.1000-8217.2002.05.007

马柱国, 符淙斌, 任小波, 等. 2003. 中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系 [J]. 地理学报, 58(S1): 11−20. Ma Z G, Fu C B, Ren X B, et al. 2003. Trend of annual extreme temperature and its relationship to regional warming in northern China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58(S1): 11−20. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.002

Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961–1998 [J]. Int. J. Climatol., 21(3): 269−284. doi:10.1002/joc.610

任福民, 翟盘茂. 1998. 1951～1990 年中国极端气温变化分析 [J]. 大气科学, 22(2): 217−227. Ren F M, Zhai P M. 1998. Study on changes of China’s extreme temperatures during 1951–1990 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22(2): 217−227. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.02.10

任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005. 中国气温变化研究最新进展 [J]. 气候与环境研究, 10(4): 701−716. Ren G Y, Chu Z Y, Zhou Y Q, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10(4): 701−716. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.04.001

Sisco M R, Bosetti V, Weber E U. 2017. When do extreme weather events generate attention to climate change? [J]. Climatic Change, 143(1–2): 227−241. doi:10.1007/s10584-017-1984-2

王翠花, 李雄, 缪启龙. 2003. 中国近 50 年来日最低气温变化特征研究 [J]. 地理科学, 23(4): 441−447. Wang C H, Li X, Miao Q L. 2003. Variety characteristics of daily minimum air temperature in China in recent 50 years [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 23(4): 441−447. doi:10.3969/j.issn.1000-0690.2003.04.009

王冀, 江志红, 张海东, 等. 2007. 1957～2000 年东北地区春季极端气

温变化及其与北极涛动的关系 [J]. 气候变化研究进展, 3(1): 41−45.　Wang J, Jiang Z H, Zhang H D, et al. 2007. Variations of spring extreme temperature indexes in northeast China and their relationships with the Arctic oscillation [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3(1): 41−45. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.01.008

王晓娟, 龚志强, 任福民, 等. 2012. 1960～2009 年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征 [J]. 气候变化研究进展, 8(1): 8−15.　Wang X J, Gong Z Q, Ren F M, et al. 2012. Spatial/temporal characteristics of China regional extreme low temperature events in winter during 1960–2009 [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 8(1): 8−15. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.01.002

吴绍洪, 尹云鹤. 2012. 极端事件对人类系统的影响 [J]. 气候变化研究进展, 8(2): 99−102.　Wu S H, Yin Y H. 2012. Impacts of climate extremes on human systems [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 8(2): 99−102. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.02.004

武丽梅, 陈璐, 王凯, 等. 2016. 中国大陆 1983～2012 年年极端气温时空变化特征 [J]. 干旱气象, 34(6): 945−951.　Wu L M, Chen L, Wang K, et al. 2016. Temporal and spatial variation characteristics of annual extreme temperature in the mainland of China during 1983–2012 [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 34(6): 945−951. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-06-0945

肖冰霜, 马玉霞, 赵天保, 等. 2016. 基于均一化资料的中国大陆极端温度的长期趋势 [J]. 气象, 42(3): 339−346.　Xiao B S, Ma Y X, Zhao T B, et al. 2016. Long-term trends in extreme temperature over China mainland based on homogenized dataset [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(3): 339−346. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.03.009

谢星旸, 游庆龙, 王雨枭. 2018. 1961～2014 年中国冬季极端低温变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 23(4): 429−441.　Xie X Y, You Q L, Wang Y X. 2018. Changes in extreme low temperature in China in the winters from 1961 to 2014 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23(4): 429−441. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17034

Xu W H, Li Q X, Wang X L, et al. 2013. Homogenization of Chinese daily surface air temperatures and analysis of trends in the extreme temperature indices [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 118(17): 9708−9720. doi:10.1002/jgrd.50791

严中伟, 杨赤. 2000. 近几十年中国极端气候变化格局 [J]. 气候与环境研究, 5(3): 267−272.　Yan Z W, Yang C. 2000. Geographic patterns of extreme climate changes in China during 1951–1997 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5(3): 267−272. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2000.03.05

杨金虎, 江志红, 魏锋, 等. 2006. 近 45a 来中国西北年极端高、低温的变化及对区域性增暖的响应 [J]. 干旱区地理, 29(5): 625−631.　Yang J H, Jiang Z H, Wei F, et al. 2006. Variability of extreme high temperature and low temperature and their response to regional warming in Northwest China in recent 45 years [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 29(5): 625−631. doi:10.3321/j.issn:1000-6060.2006.05.002

杨萍, 刘伟东, 王启光, 等. 2010. 近 40 年我国极端温度变化趋势和季节特征 [J]. 应用气象学报, 21(1): 29−36.　Yang P, Liu W D, Wang Q G, et al. 2010. The climatic change trend and seasonal characteristics of daily temperature extremes in China for the latest 40 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21(1): 29−36. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.01.004

Yoo Y E, Son S W, Lee J H, et al. 2019. Abrupt decrease of wintertime cold nights in Korea in the late 1980s [J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 55(1): 31−39. doi:10.1007/s13143-018-0057-4

You Q L, Ren G Y, Fraedrich K, et al. 2013. Winter temperature extremes in China and their possible causes [J]. Int. J. Climatol., 33(6): 1444−1455. doi:10.1002/joc.3525

张霏燕, 徐海明. 2011. 东北春季极端低温的变化特征及其与大西洋海温的关系 [J]. 大气科学学报, 34(5): 574−582.　Zhang F Y, Xu H M. 2011. Spatial/temporal variations of spring extreme low temperature in Northeast China and its relationship with SSTA in Atlantic Ocean [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(5): 574−582. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2011.05.007

Zhang Z J, Qian W H. 2011. Identifying regional prolonged low temperature events in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 28(2): 338−351. doi:10.1007/s00376-010-0048-6

翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. 地理学报, 58(S1): 1−10.　Zhai P M, Pan X H. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58(S1): 1−10. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.001

赵俊虎, 封国林, 张世轩, 等. 2011. 近 48 年中国的季节变化与极端温度事件的联系 [J]. 物理学报, 60(9): 099205.　Zhao J H, Feng G L, Zhang S X, et al. 2011. Seasonal changes in China during recent 48 years and their relationship with temperature extremes [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 60(9): 099205. doi:10.7498/aps.60.099205

周雅清, 任国玉. 2010. 中国大陆 1956～2008 年极端气温事件变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 15(4): 405−417.　Zhou Y Q, Ren G Y. 2010. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956–2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15(4): 405−417. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.08

Zhu Y L, Wang H J, Wang T, et al. 2018. Extreme spring cold spells in North China during 1961–2014 and the evolving processes [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 11(5): 432−437. doi:10.1080/16742834.2018.1514937