

娄珊珊,陈光舟,陆雅君,等.安徽省近40 a 极端温度事件的气候特征分析[J].暴雨灾害, 2019,38(1):72-78

LOU Shanshan, CHEN Guangzhou, LU Yajun, et al. Climate characteristics of extreme temperature events in recent 40A in Anhui [J].Torrential Rain and Disasters, 2019,38(1):72-78

安徽省近40 a 极端温度事件的气候特征分析

娄珊珊^{1,2},陈光舟³,陆雅君³,郝莹^{3,4}

(1. 安徽省气象台,合肥 230031;2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026;3. 淮河流域气象中心,合肥 230031;
4. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 10081)

摘要:利用1975—2014年安徽省77个观测站的日最高温度、最低温度和平均气温资料,对近40 a 极端温度事件的时空分布特征进行分析。结果表明:安徽省冬季极端低温事件的发生频次分布,总体呈北多南少,地区差异较大,极端低温事件发生次数最多的是宿州萧县。近40 a 间冬季的极端低温事件发生减少趋势显著,与冬季平均温度的显著上升相对应。年极端最低温度年际变化趋势不明显,且极端低温的发生频次与强度并不对应。夏季极端高温事件发生频次较多区域为江南。1975—2014年,夏季极端高温事件发生呈整体增多趋势,但趋势不显著。年极端最高温度的时间序列,与极端高温事件发生频次的时间序列是相对应的,呈现明显的正相关。从MK突变上看,年极端低温和高温事件发生均存在突变。分析合成环流场发现,冬季极端冷事件发生时,亚洲中高纬度环流的经向度明显增强;夏季极端暖事件的发生与副高的明显西伸增强维持有关。

关键词:极端冷事件;极端暖事件;实际累积频率分布;MK检验

中图分类号: P468.0*21 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1004-9045.2019.01.009

Climatic characteristics of extreme temperature events in recent 40 years in Anhui

LOU Shanshan^{1,2}, CHEN Guangzhou³, LU Yajun³

(1. Anhui Meteorological station, Hefei 230031; 2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026; 3. Huaihe River Basin Meteorological Center, Hefei 230031)

Abstract: Using daily maximum, minimum and mean temperature data at 77 stations in Anhui province from 1975 to 2014, the temporal and spatial distribution characteristics of extreme temperature events were analyzed. The results showed that the occurrence frequency of extreme cold events in winter has significant regional dependence, which is greater in the north than in the south, and the most frequently is in Anhui, Xiaoxian. The decrease trend of occurrence of extreme cold events of near 40 years was significant, corresponding to the significant increase trend of winter mean temperature. The annual variation of extreme minimum temperature was not obvious, and the frequency and intensity of extreme cold events do not correspond to each other. During the period from 1975 to 2014, the occurrence of extreme warm events in summer is mainly located in the south, and it had an increase trend although it was not significant. The time series of the extreme maximum temperature of the year is corresponding to the time series of the occurrence frequency of extreme warm events. From the analysis of MK mutation, the fluctuation of extreme cold events and extreme warm events both had a point mutation. The analysis of synthetic circulation field showed that the occurrence of extreme cold events in winter is closely related to the meridional dimensions of the circulation in high latitudes of Asia, while the occurrence of the extreme warm events in summer is greatly affected by the obvious westward extension and maintenance of the sub-tropical high.

Key words: extreme cold event; extreme warm event; actual cumulative frequency distribution; MK test

引言

IPCC第五次评估报告指出:从20世纪50年代开

始,全球极端天气开始增多,包括强降水、热浪、洪水和干旱等,正不断给人类带来灾害。

在全球变暖的趋势背景下,极端温度事件的变化

收稿日期:2017-09-04;定稿日期:2018-03-28

资助项目:淮河流域气象开放研究基金项目(HRM201405);中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-032);中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2015LASW-B02)

第一作者:娄珊珊,主要从事数值预报研究。E-mail:louss_1@163.com

受到众多学者的关注。任福民等^[1]、严中伟等^[2]对20世纪中期到末期我国的极端温度变化进行了分析,发现极端最低温度显著上升,而极端最高温度除了高原以外,大部分地区都在缓慢下降。翟盘茂^[3]、龚道溢等^[4]分析了1951—2000年中国北方地区的极端温度变化,指出异常低温的发生频次显著减少,异常高温的发生频次呈增长趋势,且在1990年后趋势显著。张宁等^[5]研究表明,极端温度的变化有显著的季节差异和区域差异,如1955—2005年我国极端最低气温在年、四季里均表现出稳定增暖的趋势,且增暖趋势明显大于极端高温的增暖趋势。极端最高温度在黄河下游地区的年、春季和夏季出现了较明显的降温趋势,而在华南地区,年、夏季、秋季和冬季均有较明显的增暖趋势。以上针对极端温度的统计研究中,多采用百分位阈值方法来定义极端冷暖温度,黄丹青等^[6]、李庆祥等^[7]、杨萍等^[8]对定义极端冷暖事件的阈值统计方法进行了研究,其中李庆祥指出:基于最高气温的实际样本频率分布作为实际概率分布的近似,较基于正态分布的传统的求极端气候事件阈值方法效果更好。Zhai P^[9]、刘学华等^[10]、钱维宏等^[11]、杨萍等^[8]、周雅清等^[12]分析了20世纪50年代至21世纪初我国气候极端温度指数的变化,发现极端冷指数整体呈下降趋势,其中北方地区的下降趋势要大于南方地区,且极端冷指数从20世纪80年代中后期开始显著变化;而极端暖指数,如夏季日数和炎热夜数明显增多,增多显著的区域主要在中东部,而暖昼日数主要在北方大部、西部地区和东南沿海地区有增加趋势,而长江中下游和华南等地则有减少趋势。

安徽地处我国南北气候过渡带,已有研究指出,近几十年来,安徽的年平均气温^[13]、夏季和冬季的降水都呈现显著上升^[14-15],气候呈现暖湿化趋势。在这种气候变化背景下,研究极端事件的变化具有重要意义。同时安徽也是中国重要的农牧业大省,对极端气温变化的影响较为敏感^[16-17],已往的研究多关注极端降水的变化,对温度变化的研究则侧重于平均状态,针对极端气温事件比较全面分析尚不多见,加之使用的资料站点较少,或截止年份较早,因而有必要对安徽省极端温度事件变化的时空分布特征进行全面深入地分析。

本文利用近40 a日最高、最低和平均温度资料,通过对安徽夏季(6—8月)极端高温事件和冬季(12月—次年2月)极端低温事件的空间特征和时间变化趋势进行分析,为安徽减灾防灾和应对气候变化提供科学支持。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

本文采用的实况观测资料为1975—2014年安徽

省77个市县级观测站的地面整编资料中的每日各站最高温度、最低温度和平均气温,该资料经过质量控制,且不包括高山站(如黄山站)。针对大气环流特征的分析,主要采用ECMWF的高分辨率(水平分辨率:0.75×0.75)的ERA-Interim再分析数据集资料,该数据集从1979年开始,胡增运^[18]、高路等^[19]人研究发现ERA-Interim再分析资料在中国区域有一定的适用性。

1.2 极端高温和极端低温事件的定义

本文在定义极端高(低)温时,采用日最高(低)温度进行计算。传统计算极端高(低)温阈值的方法是基于气温变量遵从均匀分布的假设进行计算,这里参考李庆祥^[7]提出的阈值计算方法,按日最高(低)气温遵从的实际累积频率分布来确定百分位阈值。以最低温度为例,具体计算方法如下:

(1) 首先确定1975—2014年冬季最低温度序列样本频率分布的组数,即:组数 = $1 + 3.22 \log N$,其中: N 为序列的样本容量。

(2) 将最低温度序列按升序排列。用极差(最大值与最小值的差)除以组数,得到每组的组距,依组距进行分组,确定各组组限(上、下限)。

(3) 计算落入各组的频数、频率和累积频率,作为实际概率分布的估计。

(4) 将第5百分位与分组后各组的累积频率值进行比较,落入某两组的累积频率值时,采用线性插值求取第5百分位值,即为阈值。

极端高温的阈值定义方法与低温类似,在求出极端高(低)温的阈值后,定义1975—2014年,当某日的最低温度低于极端低温阈值,即认为该日为一次极端低温事件;当某日的最高气温值高于极端高温阈值,即认为该日为一次极端高温事件。

2 结果分析

2.1 极端低温事件时空分布特征

2.1.1 空间分布特征

图1a给出了安徽全省冬季40 a的平均最低温度分布,从图中可以看到平均最低温度的分布是北低南高,其中淮北的东北部的平均最低温度较低,达 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$,沿江地区的平均最低温度较高,为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,南北最低温度温差可达 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从近40 a安徽省极端低温的发生频次分布(图1b)可以看到,全省总体的分布是北多南少,与平均最低温度的分布相似,地区差异较大,其中极端低温的多发区主要位于淮北的东北部,其中宿州萧县,可达15.35次/a,沿江地区发生极端低温的频次最少,尤其是安庆、芜湖等地,年平均极端低温发生频次不到1次。从40 a平均的极端最低温度分布上(图1c)

可以看到,全省的极端最低温度在-6℃以下,其分布是北低南高,淮北地区、沿淮以及江淮之间的六安地区的极端最低温度可达-7℃以下,沿江附近的宿松、

郎溪等地的极端最低温度也达到-7℃以下,尽管从低温事件的发生频次分布上看,这些地区的发生频次并不高。

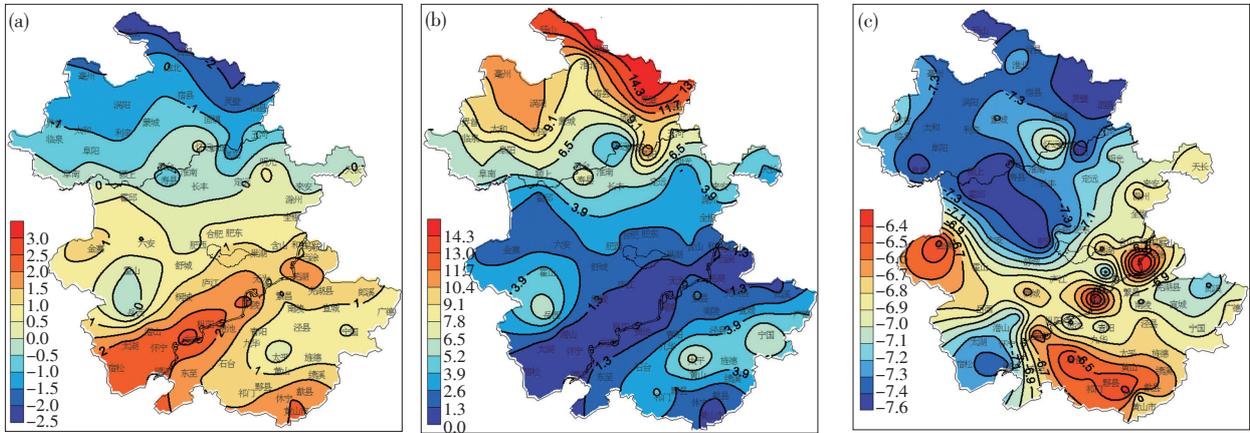


图1 1975—2014年冬季年平均最低气温(a,单位:℃)、极端低温频次(b,单位: d·a⁻¹)分布图和极端最低气温(c,单位:℃)分布图
Fig.1 (a)The annual mean minimum temperature(unit:℃)distribution, (b)extreme minimum temperature frequency(unit:day/a) distribution, and (c) extreme minimum temperature(unit:℃)distribution during 1975—2014 in winter.

2.1.2 年际变化特征

图2a为近40 a的冬季年平均温度的时间序列,从图中看到,1975—2014年冬季年平均温度约在2~6℃,整体呈波动上升趋势,增幅为0.24℃·(10 a)⁻¹,其趋势线的相关性通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验,上升趋势较显著。图2b为1974—2014年冬季单站平均的年极端低温发生日数的时间序列,单站平均的极端低温日数年际变化较大,其中1977年发生日数最多,2007年发生日数最少,1975—1986年,大部分年份的极端低温事件发生日数均超过40 a平均值。从趋势线上可以看到,出现极端低温的日数呈整体减少趋势,且通过了 $\alpha=0.02$ 显著性水平检验,下降趋势较显著,这与肖冰霜等^[20]统计的1960—2012年冷日和冷夜出现频率呈减少趋势的结论是一致的。计算极端低温发生日数和冬季平均温度两条曲线的相关系数为-0.78,呈现明显的负相关,且相关性通过 $\alpha=0.001$ 显著性水平检验,这说明极端低温的发生日数整体减少

的趋势与冬季平均温度的上升是对应的。图2c为近40 a冬季平均极端最低温度的时间变化序列,其中1992年冬季的极端最低温度达到-10.2℃,为1975年以来最低。从趋势线上看,极端最低温度的年际变化趋势不明显。对比极端低温发生日数和极端最低温度两条曲线,发现极端低温的发生频次与强度并不是对应的,例如1977年的单站平均极端低温发生日数为14.58次,平均极端最低温度仅-8.11℃;而1992年的单站平均极端低温发生日数为5.44次,平均极端最低温度可达-10.16℃。计算两者的相关系数,仅为-0.29,相关性较弱。极端低温事件发生频次多说明冷空气活动较多,这主要受大尺度环流场的影响;而极端最低温度则与冷空气的强度相对应,主要受源地、路径等的影响。李锋等^[21]研究发现20世纪70年代中国强冷事件最为频繁,80年代频次明显减少,但以偏西北路冷空气为主,且多源自新地岛东部,单次冷空气势力最强。

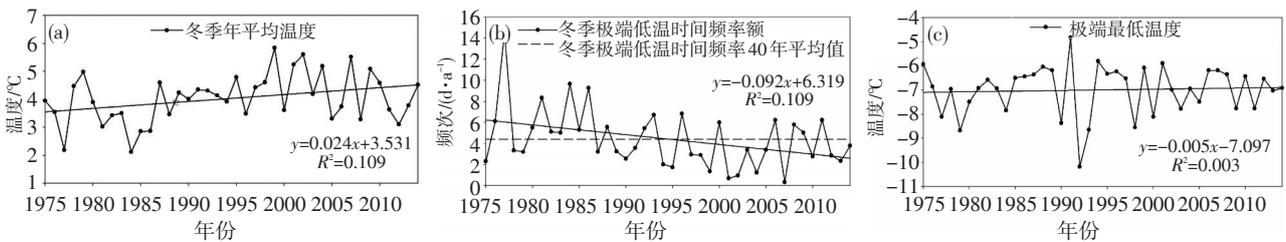


图2 1975—2014年冬季年平均温度(a,单位:℃)、冬季单站平均年极端低温发生日数(b,单位:d·a⁻¹)和冬季平均极端最低温度(c,单位:℃)的时间变化序列及其变化趋势

Fig.2 (a)The time series of annual mean temperature(unit:℃), (b)extreme cold events(unit:day/a) and (c) extreme minimum temperature (unit:℃) during 1975—2014 in winter and their variation trend.

2.1.3 突变检验

对冬季极端低温事件发生日数的时间序列进行

MK检验,从UF曲线(图3)可见,自1989年以来,冬季极端低温事件发生日数有显著减少趋势,2001年以

后,这种减少趋势大大超过了0.05临界线,表明这种减少趋势是非常显著的。根据UF和UB曲线的交点位置,确定这种极端低温事件发生日数减少是一种突变现象,具体是从1989年开始,这与刘雅星^[22]研究的中国冬季极端低温日数的减少趋势出现跃变的时间(1986年)很相近。

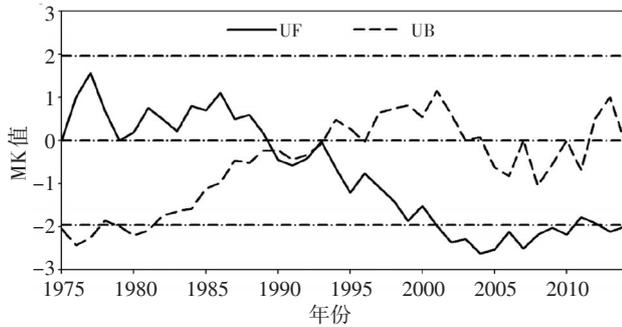


图3 1975—2014年极端低温事件发生日数时间序列的MK检验
Fig.3 MK test of the time series of extreme cold events during 1975-2014.

2.1.4 对流层环流特征分布

利用77个站点的逐日观测最低温度资料,对每个站点的温度时间序列,按照升序进行排序,挑选出40个最冷的样本日。将每个站点的40个最冷样本日合并,根据影响的站点所占百分比进行重新排序,最终根据影响

区域大小和最低温度挑选出影响范围大且强度较强(影响超过1/3的站点)的极端冷事件个例。鉴于使用的再分析资料的时间序列从1979年开始,剔除掉1980年以前的极端冷事件个例,共挑选出16个样本(表1),对极端冷事件发生时的对流层环流特征进行合成分析。

图4给出冬季平均态的500 hPa环流图和多个极端冷事件合成的500 hPa环流图及500 hPa高度场和850 hPa风场的距平图。从冬季多年平均态中可以看到,在北极附近有一个极涡中心,中纬度地区等高线比较平直。极端低温事件发生时,贝加尔湖附近的高压脊明显增强,北伸,对应东亚大槽的加深,亚洲地区的环流经向度的加大,使得中高纬冷空气向南爆发的动力偏强。同时从距平图上可以看到,在欧亚的45°N以北为正距平区,中心达7 dagpm,中低纬为负距平区,中心达-9 dagpm。马锋敏^[23]在研究北半球500 hPa高度场与江西地区冬季气温异常的关系中指出,这种高度距平场上“北正南负”的距平分布和中高纬大气环流经向度的增加都有利于高纬度冷空气的南下。郭广芬等^[24]也指出乌拉尔山阻塞高压和西伯利亚高压异常偏强及稳定维持,是长江流域冬季气温持续偏低的主要影响系统。同时从风场距平上可以看到从贝

表1 根据影响区域大小和最低温度挑选的极端冷事件样本

Table 1 Samples of extreme cold events selected based on the size of the affected area and the minimum temperature.

个例时间	影响站数/个	平均最低温度/°C	个例时间	影响站数/个	平均最低温度/°C
1991年12月28—30日	77	-12.45	2011年1月16日	55	-8.81
1980年1月30—31日	74	-9.35	1986年1月5日	49	-8.62
1990年1月31—2月1日	71	-10.54	2008年12月22日	41	-9.25
1993年1月17—19日	65	-10.16	1981年1月3日	39	-7.99
1984年1月21—25日	56	-6.67	1982年1月19日	36	-8.08
2005年1月1日	56	-8.53	2009年1月24日	35	-8.57
2000年1月26—27日	55	-9.14	1999年12月21—22日	33	-8.42
1998年1月18—19日	55	-10.25	1980年12月28日	33	-8.92

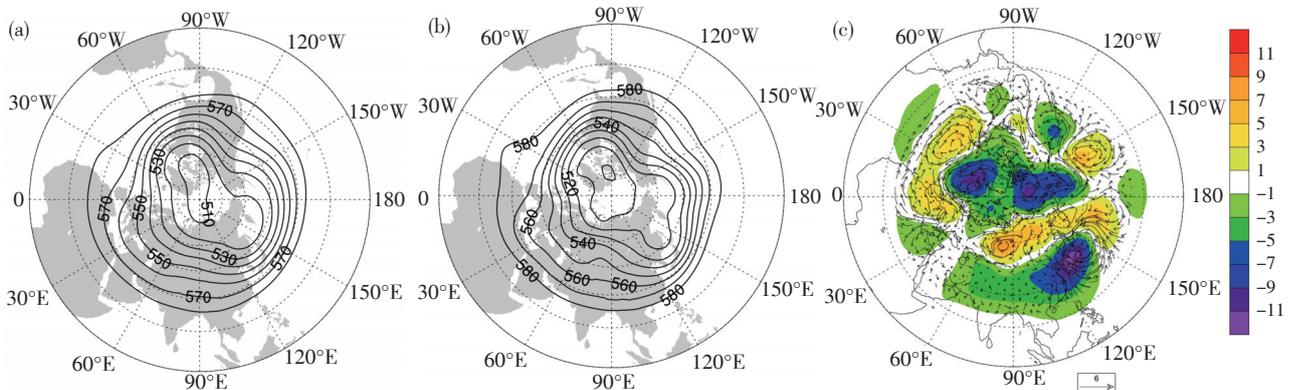


图4 冬季平均态(a)和多个极端冷事件合成(b)的500 hPa高度场(单位:dagpm)及500 hPa高度场(单位:dagpm)和850 hPa风场(单位:m·s⁻¹)的距平场(c)

Fig.4 (a)The mean state and (b) the synthesis of multiple extreme cold events of 500 hPa height field (unit: dagpm), and (c) the anomaly of 500 hPa height (unit: dagpm) and 850 hPa wind (unit: m·s⁻¹) in winter.

加尔湖地区到我国东部都有明显的偏北风的增量,这也利于将高纬度的冷空气向南输送。

2.2 极端高温事件时空分布特征

2.2.1 空间分布特征

图5a为全省夏季近40a的平均最高温度分布,从图中可以看出,全省的夏季平均最高温度分布比较平均,普遍在29~32℃,差异不大,其中淮北西部和沿江江南的夏季平均最高温度在31℃,江淮之间及淮北大

部略低。图5b为近40a安徽省极端高温事件的发生频次分布,从中可见,与平均最高温度的分布较为相似,频次多发位于江南,但江南的极端高温事件频次地区差异较大,如安庆石台的频次达12次·a⁻¹,为全省最多,而安庆岳西,仅0.52次·a⁻¹,为全省最少。从40a平均的极端最高温度分布上(图5c)发现,全省的极端最高温度差异不大,普遍在36~38℃。较夏季平均最高温度高约7℃左右。

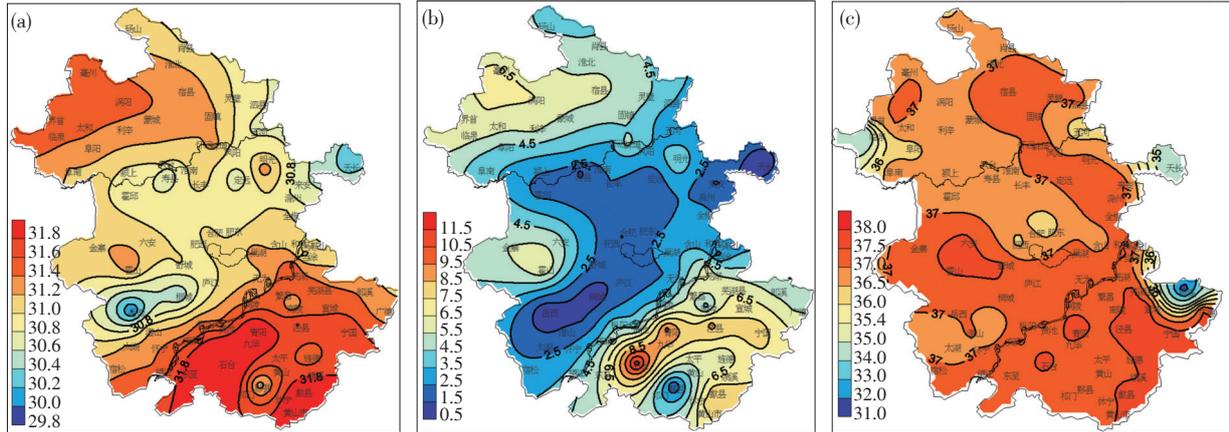


图5 1975—2014年夏季年平均最高气温(a,单位:℃)、极端高温频次(b,单位:d·a⁻¹)、极端最高气温(c,单位:℃)分布图

Fig.5 (a)The annual mean max temperature(unit:℃)distribution, (b)extreme max temperature frequency(unit: d·a⁻¹)distribution, and (c) extreme max temperature(unit:℃)distribution in summer during 1975–2014.

2.2.2 年际变化特征

图6a为近40a的夏季年平均温度的时间序列,从图中可以看到,1975—2014年夏季平均温度年际变化较大,整体呈波动上升趋势,增幅为0.2℃·(10a)⁻¹,与冬季平均温度的增幅相当。图6b为夏季单站平均年极端高温发生日数的时间序列分布,由图可见,夏季极端高温发生日数的年际变化较大,2001年以前大部分年份的极端高温事件发生日数低于40a平均值,仅1978年、1988年和1994年超过平均值,1982年发生日数最少,2013年为1975年以来,发生极端高温日数最多的年份。从趋势线上看,单站平均的年极端高温发

生日数是整体增多趋势,但仅通过α=0.1显著性水平检验,变化趋势不明显。图6c为近40a的年极端最高温度的时间序列,从中可见,其中1978年、1988年、1994年、2003年和2013年的极端最高温度达到37.5℃以上,与极端高温事件发生日数较多的年份是相对应的。计算两条曲线的相关系数为0.65,呈现明显的正相关,且相关性通过α=0.001显著性水平检验。从趋势线上看,1975年以来,年极端最高温度是升高趋势,通过了0.05的显著性水平检验,温度增幅为0.18℃·(10a)⁻¹,明显高于极端最低温度0.05℃·(10a)⁻¹的增温幅度。

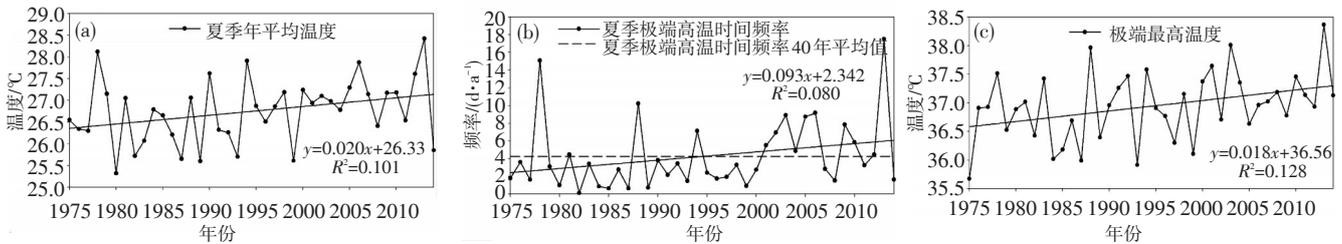


图6 1975—2014年夏季年平均温度(a)、夏季单站平均年极端高温发生日数(b)和夏季极端最高温度(c)的时间变化序列及其变化趋势

Fig.6 (a) The time series of annual mean temperature(unit:℃), (b)extreme warm events(unit: d·a⁻¹), and (c) extreme max temperature (unit:℃) in summer during 1975–2014 and their variation trend.

2.2.3 突变检验

从MK检验的UF曲线(图7)看,自2001年以来,年

极端高温发生日数有显著增多趋势,2010年以后,UF曲线超过了0.05临界线,增多趋势更加明显。根据UF

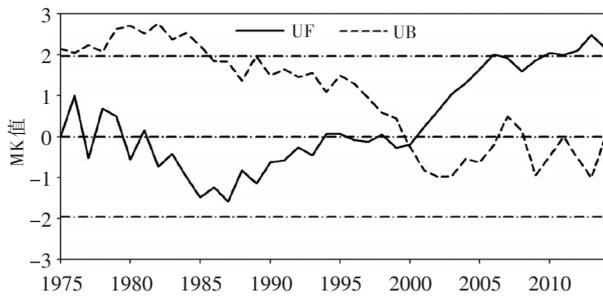


图7 1975—2014年极端高温发生日数时间序列的MK检验

Fig.7 MK test of the time series of extreme warm events during 1975-2014.

和UB曲线的交点位置,确定这种极端高温发生日数增多是一种突变现象,具体是从2000年开始。

2.2.4 对流层环流特征分布

利用77站点逐日观测最高温度资料,对每一个站点时间序列按降序排序,挑选出40个最暖的样本日,将每个站点的40个最暖样本日合并,根据影响站点所占百分比重新排序。最终根据影响区域大小和最高温度挑选出影响范围大且强度较强(影响超过1/3的站点)的极端暖事件个例,共8个样本(表2),对极端暖事件发生时的对流层环流特征进行合成分析。

表2 根据影响区域大小和最高温度挑选的极端暖事件样本

Table 2 Samples of extreme warm events selected based on the size of the affected area and the max temperature.

个例时间	影响站数/个	平均最高温度/℃	个例时间	影响站数/个	平均最高温度/℃
2013年8月6—18日	68	39.14	2010年8月4日	40	38.68
1988年7月17—19日	68	38.96	1994年7月10日	38	37.84
2003年7月30—8月2日	68	39.15	1994年8月3日	38	37.46
1988年7月8—10日	48	38.83	2002年7月14—15日	35	38.69

图8给出的是夏季(6—8月)平均态的500 hPa高度场和多个极端暖事件合成的500 hPa高度场,可以看到在极端高温事件发生时,副高(588 dagpm线)较平均态,有明显的西伸和北抬,副高控制全省,副高中心的下沉气流有利于安徽省的高温天气的维持。图9给出了平均态200 hPa纬向风场和高温事件发生时合成

的200 hPa纬向风场,及距平场,可以看到,在极端高温事件发生时, $u > 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围比气候平均态明显偏大、偏北,说明西风急流范围明显偏大,纬向环流偏强。与之对应在此区域内的500 hPa高度场上中高纬环流比平均态环流较平直,冷空气活动较少,有利于副高的稳定维持。

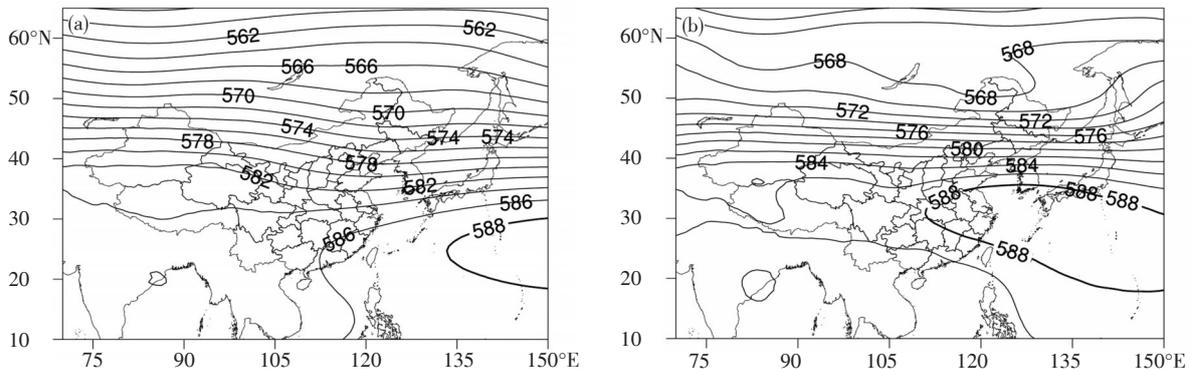


图8 夏季平均态(a)和多个极端暖事件合成(b)的500 hPa高度场(单位:dagpm)

Fig.8 (a)The mean state and (b) the synthesis of multiple extreme warm events of 500 hPa height field (unit:dagpm).

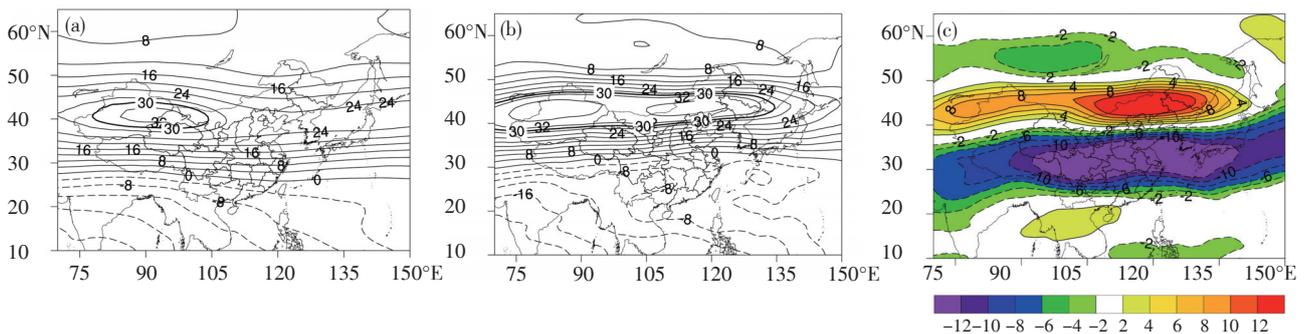


图9 夏季平均态(a)和多个极端暖事件合成(b)的200 hPa的纬向风场及200 hPa纬向风距平场(c)(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.9 (a)The mean state and (b)the synthesis of multiple extreme warm events of 200 hPa zonal wind field, and (c) its anomaly in summer(unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

3 结论与讨论

利用安徽省77个站40 a的站点实况温度资料,在分析了夏季极端高温事件和冬季极端低温事件发生的空间分布特征和时间变化趋势,同时结合ECMWF的较高分辨率的再分析资料,对影响极端高(低)温事件的大气环流场特征进行了分析,得到以下结论:

(1) 1975—2014年冬季安徽省极端低温事件的发生频次分布,总体呈北多南少,地区差异较大,频次多发地区对应的冬季平均最低温度也较低;40 a平均的冬季极端最低温度分布亦呈北低南高。夏季极端高温事件的频次分布与平均最高温度的分布较为相似,频次多发区位于江南,40 a平均的极端最高温度分布全省差异不大。

(2) 1975—2014年冬季单站平均极端低温事件发生次数呈显著减少趋势,与冬季平均温度上升相对应,年极端最低温度总体变化趋势不明显,且极端低温事件发生频率与强度不对应;近40 a夏季单站平均极端高温事件发生次数呈增多趋势,且与极端最高温度的年际变化曲线有显著的正相关。

(3) 从MK突变上看,年冬季极端低温和夏季高温事件发生均有突变,极端低温事件发生日数减少的突变在1988年,极端高温事件发生日数增加的突变位于2000年。极端低温事件突变时间明显早于极端高温事件突变时间。

(4) 冬季极端冷事件发生时,亚洲中高纬度地区环流经向度明显增强,西伯利亚上空有明显的正距平分布,强度增强,偏北风的异常分量有利于冷空气的南下。夏季极端暖事件发生时,副高有明显的西伸增强,同时200 hPa上西风急流加强,对应中高纬度的风带较为平直,扰动减少,有利于副高维持。

1975—2014年安徽省极端低温发生频次的显著降低与极端高温发生频次的增多与全国的研究统计结果基本一致,也符合全球变暖背景下平均温度升高的变化趋势;极端最高温度和极端最低温度的年际变化与前人统计研究的全国极端温度的变化结果有所差异,这可能由于研究区域、对于极端气温的计算方法及使用资料的时间尺度不同有关,后续有待进一步探讨。

参考文献:

[1] 任福民. 1951—1990年中国极端气温变化分析[J]. 大气科学, 1998, 22(2):217-227

- [2] 严中伟,杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3):267-272
- [3] 翟盘茂,潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58(s1):1-10
- [4] 龚道溢,韩晖. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析[J]. 地理学报, 2004, 59(2):230-238
- [5] 张宁,孙照渤,曾刚. 1955—2005年中国极端气温的变化[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(1):123-128
- [6] 黄丹青,钱永甫. 我国极端温度事件的定义和趋势分析[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2008, 47(3):112-116
- [7] 李庆祥,黄嘉佑. 对我国极端高温事件阈值的探讨[J]. 应用气象学报, 2011, 22(2):138-144
- [8] 杨萍,侯威,封国林. 基于去趋势波动分析方法确定极端事件阈值[J]. 物理学报, 2008, 57(8):5 333-5 342
- [9] Zhai P, Sun A, Ren F, et al. Changes of climate extremes in China [J]. Climatic Change, 1999, 42(1):203-218
- [10] 刘学华,季致建,吴洪宝,等. 中国近40 a极端气温和降水的分布特征及年代际差异[J]. 热带气象学报, 2006, 22(6):618-624
- [11] 钱维宏,符娇兰,张玮玮,等. 近40 a中国平均气候与极值气候变化的概述[J]. 地球科学进展, 2007, 22(7):673-684
- [12] 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
- [13] 闫俊,王海功,李红梅. 气候变暖背景下安徽气温变化趋势分析[J]. 安徽农业科学, 2013(36):13 953-13 955
- [14] 丁建隆,汪海欧,董召荣,等. 1960~2013年安徽极端降水特征研究[J]. 干旱气象, 2016, 34(2):252-260
- [15] 江俊杰,孙卫国. 1959-2007年安徽省降水时空变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(1):27-33
- [16] 付伟,许信旺,司红君,等. 极端气温事件对安徽省农业生产的动态影响分析[J]. 气象科学, 2014, 34(4):443-449
- [17] 王胜,田红,谢五三,等. 近50 a安徽省冬半年寒潮气候特征及其对越冬作物的影响[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(2):188-192
- [18] 胡增运,倪勇勇,邵华,等. CFSR、ERA-Interim和MERRA降水资料在中亚地区的适用性[J]. 干旱区地理(汉文版), 2013, 36(4):700-708
- [19] 高路,郝璐. ERA-Interim气温数据在中国区域的适用性评估[J]. 亚热带资源与环境学报, 2014(2):75-81
- [20] 肖冰霜,马玉霞,赵天保,等. 基于均一化资料的中国大陆极端温度的长期趋势[J]. 气象, 2016, 42(3):339-346
- [21] 李峰,矫梅燕,丁一汇,等. 北极区近30年环流的变化及对中国强冷事件的影响[J]. 高原气象, 2006, 25(2):209-219
- [22] 刘雅星,范广洲,董一平,等. 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, 2010, 25(3):286-292
- [23] 马锋敏,黄彩婷,张传江,等. 江西地区冬季气温异常与北半球500hPa高度场的关系[J]. 气象与减灾研究, 2013(1):32-38
- [24] 郭广芬,周月华,高正旭,等. 2011年冬季长江流域气温持续偏低的可能成因探析[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(2):176-181

(责任编辑 邓 雯)