

最概然温度背景下不同气候态中国夏冬季 极端温度事件时空分布特征*

钱忠华¹⁾ 侯威²⁾ 杨萍³⁾ 封国林^{1)2)†}

1)(扬州大学物理科学与技术学院,扬州 225009)

2)(国家气候中心,北京 100081)

3)(中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089)

(2010年11月24日收到;2011年1月5日收到修改稿)

利用1961—2009年中国逐日最高温度资料,分成1961—1990年、1971—2000年和1981—2009年三个气候态(分别称为I, II, III态),基于偏态概率密度函数定义极端温度事件,从频次、强度两个角度研究了不同气候态下中国夏季和冬季极端温度事件的时空变化特征. 空间分布上,夏季极端高温的频次、强度在I态黄淮、江淮流域显著减小,在III态,干旱半干旱以及经济发达的长江沿岸、长江三角洲以及东南沿海地区显著增加;冬季极端低温频次在II态中的北方、长江三角洲以及III态中的高原、东北东南部、长江三角洲显著降低. 冬季极端低温强度整体呈降低趋势,但区域特征不明显. 极端温度频次和强度在空间上一致性较好;时间演化上,夏季极端高温频次、强度均在II, III态显著增加,冬季极端低温频次、强度降低的趋势有所减缓. 在当前气候态(III态)夏季极端高温在经济发达地区发生比较频繁且极端性在增强;冬季极端低温的发生维持在一个稳定状态且极端性也相对比较稳定. 极端温度事件的频次与强度在时间变化趋势上存在较好的一致性. 在I, II, III态共同时段内,后一气候态检测出的极端高温频次均比前一气候态少,极端低温频次均比前一气候态多,这与背景温度随气候态逐渐升高是相一致的;后一气候态检测出的极端高温强度均比前一气候态小,极端低温强度均比前一气候态大. 在20世纪70年代末80年代初全球气候系统突变前,极端高温频次具有明显的下降趋势,突变后显著上升;极端低温频次在突变前后变化不明显. 极端高温强度突变前表现出轻微的下降趋势,在突变后上升趋势明显;极端低温强度在突变前后大致相当,突变后的整体强度稍低于突变前.

关键词: 极端高温, 极端低温, 气候态

PACS: 92.70.Aa

1. 引言

伴随着气候变暖,极端天气和气候事件频繁发生,人类的生存和发展面临巨大挑战^[1,2]. IPCC第三次报告和第四次评估报告都对极端天气气候事件作了明确的定义,对一特定地点和时间,极端天气气候事件从概率分布的角度来看,就是发生概率极小的事件,通常发生概率只占该类天气现象的10%或者更低^[3]. Karl等的研究表明,过去几十年中,极端低温事件发生频率以及霜冻日数都有减少趋势,20世纪后半叶逐年的极端最高温度与极

端最低温度的差异显著减小^[4]. Manton等发现自1961年以来,东南亚和南太平洋地区的热日(hot days)和暖夜(warm night)显著增多,而冷日和冷夜却减少了^[5]. 我国气象工作者也已从不同角度研究了气候变暖背景下极端温度事件特点及其变化,翟盘茂等^[6]研究了中国北方近50年温度极端事件的变化. 潘晓华等^[7]指出,我国极端温度事件频率呈10a左右的年代际振荡,冬季全国增温趋势最大并且最明显. 钱永甫等^[8]根据频数、平均强度分析中国极端温度事件的气候趋势及其区域特征. 孙照渤等^[9]通过计算趋势系数研究了中国年、季极端气温变化趋势的时空特征. 封国林等^[10,11]结合具有实际

* 国家自然科学基金(批准号:41005043,40930592),国家科技支撑项目(批准号:2007BAC29B01,2009BAC51B04)和全球变化研究国家重大科学研究计划(2010CB950504)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: fenggl@cma.gov.cn

意义的季节极端温度指数,分析了我国近 40 年极端温度事件的年变化趋势和季节特征,得到不同的动力学温度变化特征区。

目前对于温度或降水等极端事件的定义还不尽相同,而且不同区域和不同季节之间的定义也存在着较大差异,增加了极端事件研究中的不确定性^[12]。关于极端事件和年代际气候突变之间的内在联系,以及气候突变前后极端温度频次、强度的变化等方面的研究还相对较少。本文分别以 1961—1990 年、1971—2000 年、1981—2009 年为三个基准气候态,基于偏态概率密度函数对极端温度事件进行定义,得到了不同气候态中极端温度事件频次、强度的时间演化和空间分布特征,揭示中国极端温度事件的变化事实以及发展趋势,研究气候变暖背景下中国极端温度事件是否更加趋于极端化、是否更为频繁等问题。

2. 资料及方法

本文采用中国气象局国家气象信息中心资料室提供的中国 696 个台站 1961—2009 年逐日最高气温资料,针对夏季和冬季的极端温度事件开展研究工作。

气候统计中依据观测资料研究气候平均量的变化趋势和气候变率的时空特征,以及探讨两个要素场之间的相互关系等工作一般都假设原始数据服从正态分布^[13-15]。但实际资料不可能绝对服从某种理论分布,只能是在一定精度下的无限近似。因此利用 Box-Cox 变换可以改善数据正态性分布的特点,经过理论推导得到温度场非正态分布下的概率密度函数,即偏态函数 $p(x)$ ^[16] 为

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(T_{i0} - T_{\min})^\lambda} e^{-\frac{((\frac{x-T_{\min}}{T_{i0}-T_{\min}})^\lambda - 1 - \lambda u)^2}{2\lambda^2\sigma^2}} \times (x - T_{\min})^{\lambda-1}, \quad (1)$$

其中 T_{\min} 为温度序列 $\{T_{i0}\}$ 的最小值, λ 为变换指数, σ 为变换后数据的标准偏差, u 为变换后序列的均值。

由(1)式,令 $\frac{dp}{dT} = 0$, 得温度序列的最概然温度 T_p 为

$$T_p = \left(\frac{\bar{T}^\lambda + \sqrt{\bar{T}^{2\lambda} + \frac{2(\lambda-1)}{b\lambda}}}{2} \right)^{\frac{1}{\lambda}}, \quad (2)$$

$$\text{其中 } \bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{i0}, \quad b = \frac{1}{2\lambda^2\sigma^2 \bar{T}^{2\lambda}}.$$

本文定义每个站点温度序列偏态概率密度分布曲线两端所对应的第 10% 和第 90% 分位数为小概率事件,即定义概率小于 10% 的温度事件为极端低温事件,第 10% 百分位所对应的温度为极端低温事件的阈值;大于 90% 的温度事件为极端高温事件,第 90% 百分位所对应的温度为极端高温事件的阈值。

通过趋势系数^[17,18]可了解气象要素的长期趋势变化,趋势系数是无量纲的,在 $[-1, 1]$ 之间变化,其本质上是标准化的一元线性回归系数,它消去了气象要素的均方差和单位对线性回归系数大小的影响,从而可以在不同的地理位置、不同的气象要素之间进行比较,尤其适合研究大范围气象场的长期空间变化特征。本文中对计算得到的趋势系数进行了显著性水平检验。

“基准气候态”就是将某一气候相对稳定的时期作为“基准气候时期”,并以其为基点来描述不同时期的基本气候条件^[19]。根据世界气象组织(WMO)的定义,某气象要素 30 年的平均值可作为气候基准值。本文定义 1961—1990 年、1971—2000 年、1981—2009 年为第一,第二,第三基准气候态,记为 I, II, III 态,比较不同气候态中极端高温、极端低温事件的发生频次、强度等特征,研究极端高温和极端低温事件的时空变化特征。

3. 最概然温度变化规律

统计物理学认为,宏观系统的特性是大量微观运动的集体表现,每种微观运动形式会有多种分布,其中微观运动形式所占概率最大的分布称最概然分布^[20],其描述了宏观系统的平衡状态。温度的最概然分布反映了温度场宏观平衡状态的特性,它反映某区域最可能出现的温度状态,表征了该区域温度场最可能发生的背景温度,因此以不同气候态下最概然温度的变化作为中国各地区的背景温度场是一个研究气候变化的新思路。图 1(a) 为 I 态夏季最概然温度分布,区域分布特征显著。青藏高原东部最概然温度较低,新疆中部、内蒙古中部、黄淮和江淮流域以及长江以南地区最概然温度较高。图 1(b) 为冬季 I 态最概然温度的分布情况,纬向分布特征明显,广东、广西、贵州、云南一带为高值区,东北部为低值区。

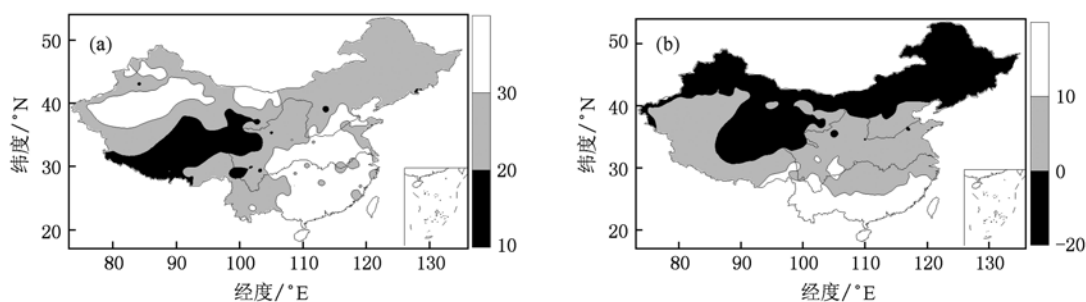


图1 夏季和冬季态最概然温度分布(单位:°C) (a)夏季I态最概然温度分布;(b)冬季I态最概然温度分布

图2为夏季和冬季各气候态最概然温度空间变化分布图. 夏季II态相对于I态最概然温度在黄河—秦岭以南地区显著下降,最大幅度接近1°C,对应了I态最概然温度的高值区. 西藏、青海部分地区有所上升,但增暖幅度不大(图2(a)),小于

0.4°C. III态相对于I态最概然温度上升强度和范围有所增大. 增温明显的地区主要集中在青藏高原东部、内蒙古中东部至东北一带的干旱半干旱地区,其中内蒙古东部和青藏高原增温最为显著(图2(b)),最高达1.5°C. III态相对于II态最概然温度

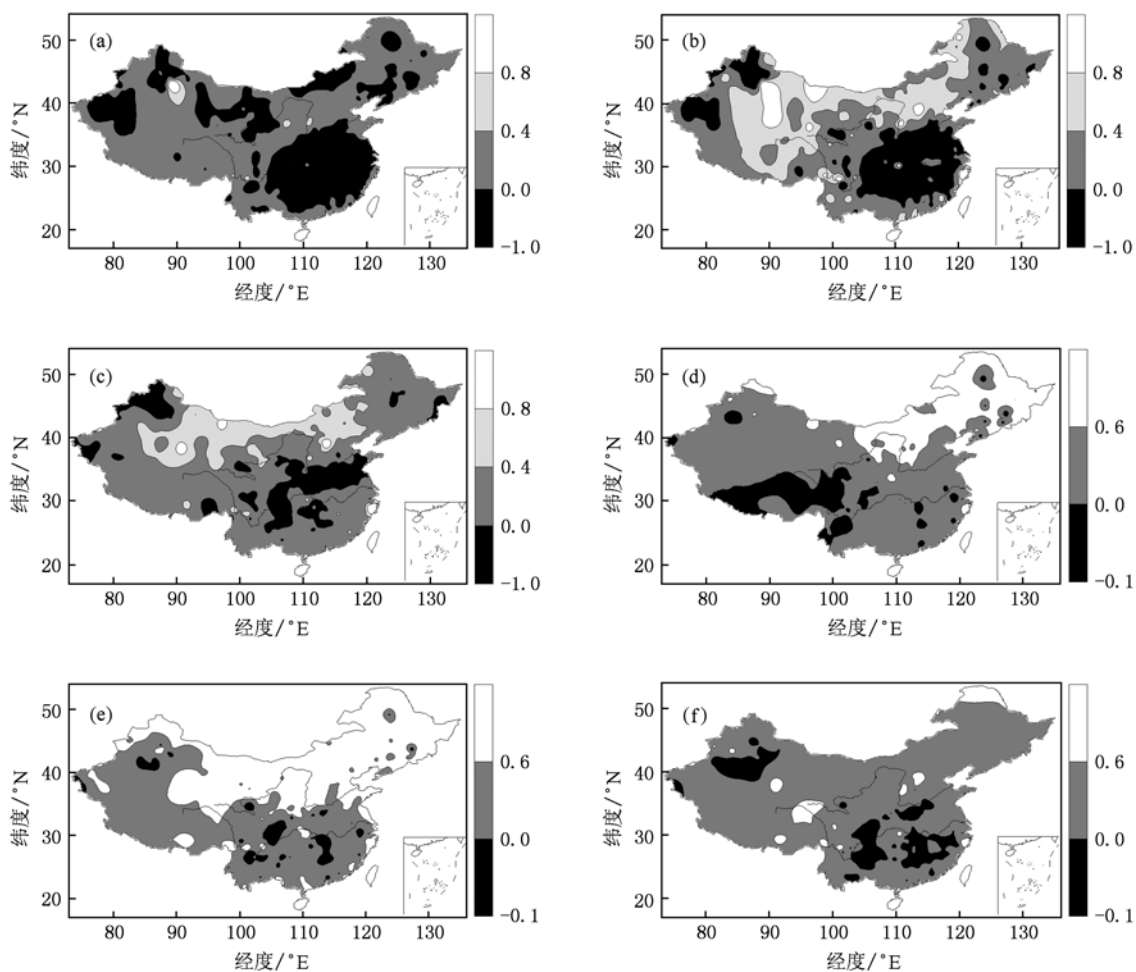


图2 夏季和冬季各气候态最概然温度比较(单位:°C) (a)夏季II态相对于I态最概然温度之差;(b)夏季III态相对于I态最概然温度之差;(c)夏季III态相对于II态最概然温度之差;(d)冬季II态相对于I态最概然温度之差;(e)冬季III态相对于I态最概然温度之差;(f)冬季III态相对于II态最概然温度之差

上升幅度有所减缓,范围也有所缩小;最概然温度下降区域也在缩小,集中在河南、重庆、四川、湖北、湖南、江苏、安徽一带(图2(e)).从图2可以看出,相对于I态,II态和III态中中国黄河下游及其以南大部地区都是一个显著降温的区域;即使相对于II态,III态中黄淮、西北地区东南部和西南地区东北部依然是一个显著降温的区域.说明在全球升温尤其是20世纪末以来快速增暖的背景下,中国黄河下游及其以南大部地区1971—2009年间夏季最概然温度是不升反降.

冬季II态相对于I态最概然温度显著增暖集中在35°N以北地区,幅度最大达1.2℃.西藏及云南北部地区显著下降,最大降幅超过0.5℃(图2(d)).III态相对于I态最概然温度增暖的范围向青藏高原地区扩张且强度更大,增幅最大达1.5℃(图2(e)).III态相对于II态最概然温度上升的幅度和范围都有所减小,而四川、重庆、河南、湖南、湖北等部分地区最概然温度在降低(图2(f)).

综上所述可知,夏季最概然温度在青藏高原较低,新疆中部、黄淮和江淮流域及长江以南地区较高.最概然温度降低的区域主要是背景温度的高值区,但降低的区域范围逐渐减小;最概然温度升高的区域其增暖幅度有所减缓.冬季最概然温度随纬度增加逐渐降低,在背景温度值低的北方显著增暖.值得注意的是冬季最概然温度在背景温度值高的长江以南的部分地区在下降.I,II,III态全国最概然温度平均值夏季分别为27.87,27.88,28.03

℃,相对于I态,II态和III态分别上升了0.01和0.16℃;冬季分别为3.82,4.16,4.39℃,与全球气候变暖的背景相一致,相对于I态,II态和III态分别上升了0.34℃和0.57℃,相对于夏季,冬季升温更加显著.值得注意的是,在全球增暖的背景下,尽管近50年来冬季和夏季的最概然温度在全国的整体水平上均呈上升趋势,但在局部地区却仍然出现了相反的演变状态,例如夏季的中国黄河下游及其以南大部地区和冬季的青藏高原及其东侧、西南地区东北部、江南中部以及黄淮西部,说明不同地区对于温室气体及全球气候变化的响应也不尽相同,因此对于全球气候变化的原因及其影响还需要进一步深入研究.

4. 不同气候态下极端温度事件空间分布

4.1. 极端温度事件阈值的空间分布

图3为I态夏季和冬季极端高低温事件阈值的空间分布.夏季极端高温阈值在青海、甘肃、西藏一带为低值区,华中北部、黄淮、江淮以及长江以南地区为高值区(图3(a)).图3(b)表明I态中冬季极端低温阈值的纬向分布特征明显.在35°N以北小于零,为极端低温阈值低值区且随纬度增加阈值降低;35°N以南为大于零的极端低温阈值高值区,阈值随纬度降低阈值升高.

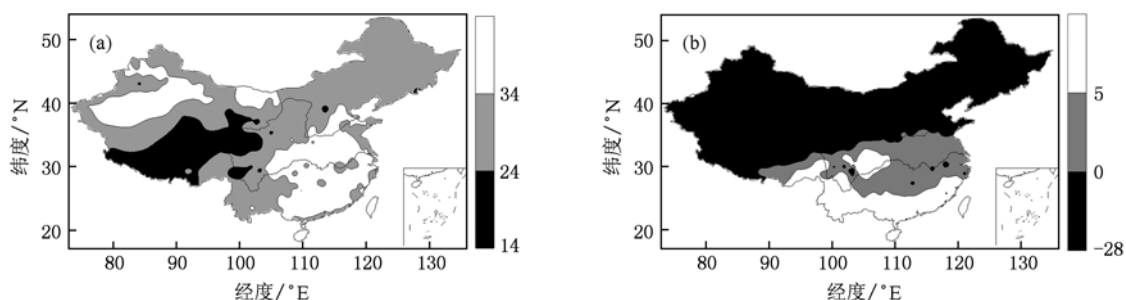


图3 夏季和冬季I态极端温度阈值分布(单位:℃) (a)夏季I态极端高温阈值分布;(b)冬季I态极端低温阈值分布

图4给出了夏季和冬季各气候态极端温度阈值变化空间分布.夏季,相对于I态,II态中极端高温的阈值有所下降,下降幅度最高达0.8℃左右(图4(a)),且下降区正对应于I态中阈值的高值区.III态相对于I态,极端高温阈值在内蒙古、青海、甘肃、西藏以及新疆东部显著增加,增加幅度最大达

1.4℃;黄淮、江淮以及长江以南地区的阈值继续下降,下降的区域相对于II态有所缩小(图4(b)).III态相对于II态,极端高温阈值显著增加和降低的区域均有所缩小,下降的高值区域集中在黄淮地区(图4(c)).同图2类似,相对于I态,II态中中国黄河下游及其以南大部地区,及III态中的黄淮、江

淮、江汉和江南南部都是一个极端高温阈值显著下降的区域;相对于 II 态, III 态中黄淮地区的极端高温阈值也同样显著下降.

冬季, II 态相对于 I 态, 极端低温阈值在中国北方显著升高, 幅度最大达 1.6 °C, 阈值在青藏高原东部及西南西部地区明显降低, 下降幅度最大超过 0.7 °C (图 4(d)). III 态相对于 I 态, 极端低温阈值升高的范围进一步向南扩大, 而阈值降低的区域有所缩小(图

4(e)). III 态相对于 II 态, 极端低温阈值在全国大部分地区均升高, 但上升幅度相对于 I 态要小(图 4(f)). 相对于 I 态, II 态中黄河以北大部地区的极端低温阈值都是显著上升的, III 态较 II 态阈值的上升更加迅速且范围更大, 进一步扩大至整个中国北方、黄淮、江淮、江汉、西北地区东部、江南东部和华南东部地区, 扩大至整个中国北方地区. 同时, 在青藏高原及其东侧局部地区的极端低温阈值反而是下降的.

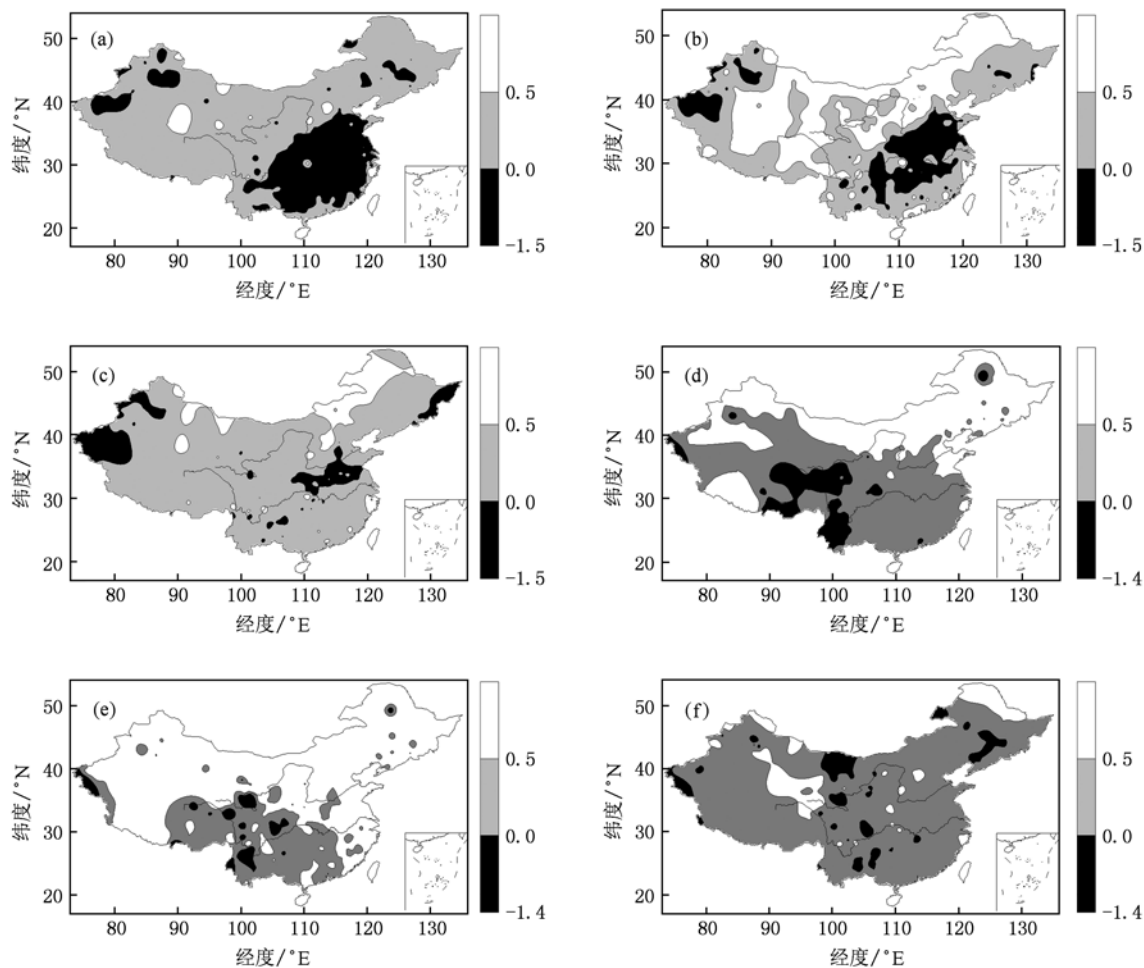


图 4 夏季和冬季各气候态极端温度阈值比较(单位:°C) (a)夏季 II 态相对于 I 态极端高温阈值之差;(b)夏季 III 态相对于 I 态极端高温阈值之差;(c)夏季 III 态相对于 II 态极端高温阈值之差;(d)冬季 II 态相对于 I 态极端低温阈值之差;(e)冬季 III 态相对于 I 态极端低温阈值之差;(f)冬季 III 态相对于 II 态极端低温阈值之差

综合上述分析, 相对于 I 态(1961—1990 年), 在 II 态(1971—2000 年)中, 中国极端高温事件的阈值在高值区具有明显的下降趋势; 极端低温阈值在中国北方显著升高, 在青藏高原东部及西南西部地区明显降低. 相对于 II 态(1971—2000 年), III 态(1981—2009 年)中, 极端高温阈值和极端低温阈值基本无显著差异, 黄淮、内蒙古东部和

东北东部地区在 2000 年之后变化较大. 表明, 自 1961 年以来, 中国极端高温事件的阈值在内蒙古上升明显, 主要下降区位于中国黄河以南的南方地区, 尤其是黄淮流域近 50 年来一直具有显著下降趋势; 极端低温阈值在中国大部地区均为上升趋势, 尤其是在中国北方, 但在 2000 年后上升趋势变缓. I, II, III 态全国夏季极端高温阈值平均

为 31.55, 31.61, 31.85 °C, 相对于 I 态, II 态和 III 态分别上升了 0.06 和 0.30 °C; 冬季分别为 -1.8, -1.37, -1.13 °C, 相对于 I 态, II 态和 III 态分别上升了 0.43 和 0.67 °C, 冬季极端事件阈值的上升比夏季更加显著. 注意到虽然在全球增暖的背景下, 最概然温度总体在上升, 但中国中东部的极端高温阈值和青藏高原及其东侧局部地区的极端低温阈值反而是下降的.

综合比较图 3 和图 1 发现, 极端温度阈值的空间分布与最概然温度的空间分布呈很好的区域正相关, 夏季两者相关系数为 0.8, 冬季为 0.74, 通过了显著性水平 0.01 的信度检验. 各气候态中阈值的差异与最概然温度的差异也具有较好的区域正相关(图 4 和图 2), 夏季相关系数为 0.62, 冬季为 0.46, 通过了显著性水平 0.01 的信度检验. 在夏季, 最概然温度和极端高温阈值趋势不一致的地区主要出现在 II 态相对于 I 态的中国东北、内蒙古中部、西北地区中部、新疆西部和北部(图 2(a) 和图 4(a)), III 态相对于 I 态的江南北部和江淮(图 2(b) 和图 4(b)), III 态相对于 II 态的西北地区东北部(图 2(c) 和图 4(c)); 冬季最概然温度和极端低温阈值趋势不一致的地区主要出现在 III 态相对于 II 态的江南中部地区(图 2(f) 和图 4(f)). 从对比可以看出, 在全球增暖背景下, 不同地区极端温度事件阈值的高低对增暖的响应速率不同, 上述不一致的地区都表现为较快的响应速率, 即在整体温度上升之前一段, 这些地区极端高温(低温)事件阈值已经表现为增大(降低)趋势, 可以认为这些同步性不一致的地区是气候变化的敏感区; 这种超前性主要发生在夏季的最概然温度和极端高温事件阈值之间, 冬季只出现在最概然温度总体水平较高却上升相对较缓的时期(III 态相对于 II 态), 说明这种区域超前性具有季节差异, 夏季的响应相对冬季更快.

4.2. 极端温度事件的空间分布特征

4.2.1. 频次分布

根据不同气候态极端温度阈值检测出各气候态发生的极端温度事件的频次(日最高温超过(低于)极端高温(极端低温)阈值的次数), 图 3 给出了夏季和冬季各气候态极端温度事件频次的趋势系数分布图. 本文采用显著性水平为 0.05 显著性检验, 趋势系数临界值为 0.35, 绝对值大于 0.35 定义

为正或负趋势显著. 图中深色点为通过 0.05 显著性检验的站点, 其中黑色圆点代表显著负趋势站点, 黑色三角形代表显著正趋势站点. 分析图 5 可知, I 态中夏季极端高温频次在华北北部、河南、重庆、江苏、安徽、湖南和江西南部呈显著负趋势, 趋势系数最大为 0.6, 负增长速率为 -3.19 次/10 a; 广西、广东、福建部分地区频次呈显著正趋势. II 态中夏季极端高温频次呈正趋势的区域扩大, 但增长不明显, 显著升高地区比 I 态增加了内蒙古西部、新疆南部以及广西地区, 最大达 0.7, 增长速率为 6.11 次/10 a. III 态中除新疆西南部部分地区外, 中国其余地区的夏季极端高温频次基本呈正趋势, 且在内蒙古、甘肃、青海、西藏干旱半干旱地区以及新疆东南部、云南、长江沿岸以及长江三角洲和东南沿海地区呈显著增多趋势, 趋势系数最大超过 0.8, 增长速率为 7.18 次/10 a.

冬季极端低温频次在 I 态中仅有几个站点有显著下降趋势. 内蒙古、青海、甘肃、青藏高原所处的干旱半干旱地区呈弱的负趋势, 四川、重庆、湖北以及长江以南的大部分地区呈弱的正趋势. II 态呈显著下降的区域特征较明显, 集中在新疆西南部、内蒙古中西部、宁夏、陕西以及长江三角洲一带, 负趋势达 -0.6, 负增长速率为 -5.62 次/10 a; 长江以南大部分地区也开始表现出的负趋势. III 态中冬季极端低温频次则在新疆东南部、东北东南部、甘肃、青海、西藏以及长江三角洲以及福建部分地区显著降低, 负趋势最高为 -0.7, 负增长速率为 -5.77 次/10 a.

已有研究^[7-10]指出夏季暖日指数在黄淮、江淮流域呈负增长趋势, 冬季暖日数在我国北方显著减少. 由本文不同气候态的分析结果可知, 对于中国夏季极端高温频次, 1961—1990 年间(I 态)在黄淮流域显著减小, 1981—2009 年以来(III 态), 尤其是 20 世纪 90 年代以来, 在干旱半干旱以及长江沿岸、长江三角洲以及东南沿海的经济发达地区显著增加. 对于冬季极端高温频次, 1971—2000 年间(II 态)尤其是 20 世纪 90 年代在北方、长江三角洲, 以及 1981—2009 年间(III 态)尤其是 20 世纪 90 年代以来的青藏高原、东北东南部、长江三角洲地区显著降低.

4.2.2. 强度分布

定义极端温度事件温度值与阈值之差的绝对值总和与频次的比值为极端温度事件强度, 从极端

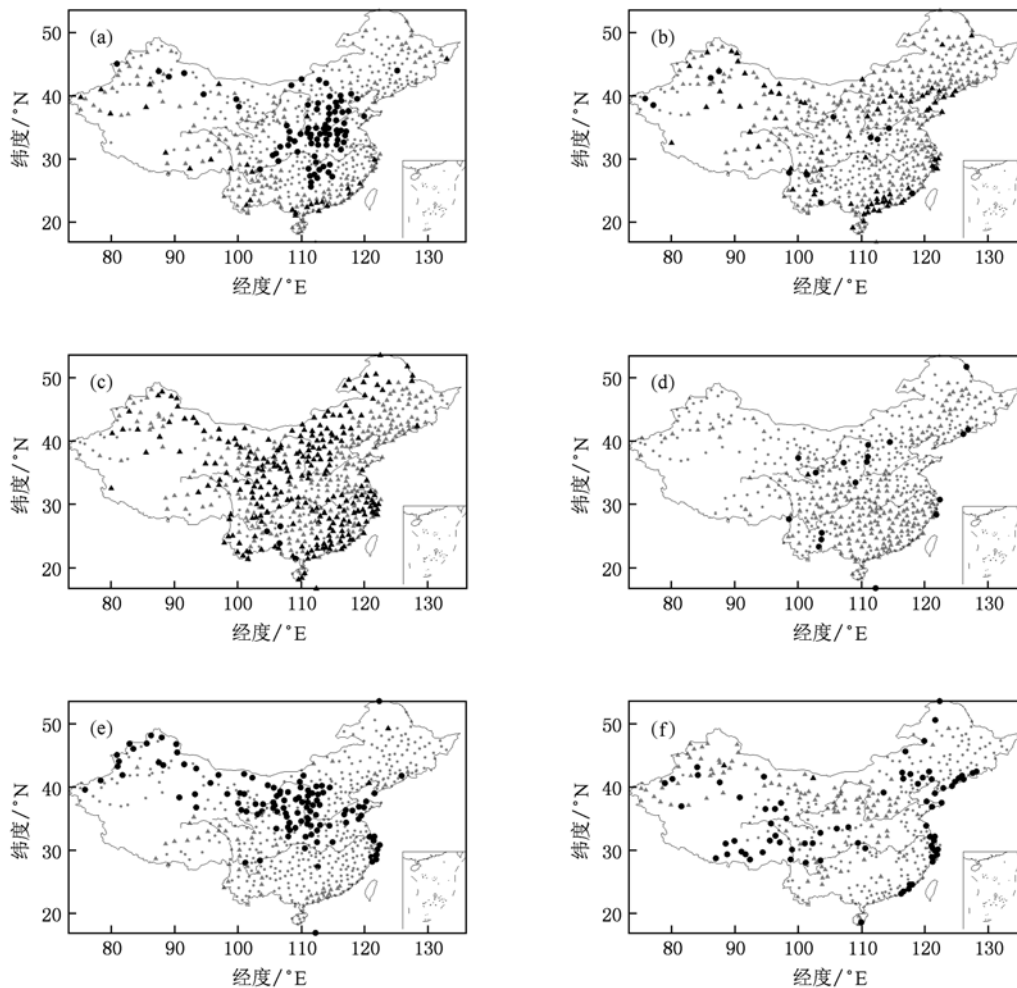


图5 夏季和冬季极端温度事件频次趋势系数分布图 (a),(b),(c)分别为夏季极端高温频次I, II, III态趋势系数分布图; (d),(e),(f)分别为冬季极端低温频次I, II, III态趋势系数分布图

性角度研究极端温度事件的强度特征. 图6给出了不同气候态下,夏季和冬季极端温度事件强度的变化趋势. 夏季极端高温事件强度总体随气候态呈正趋势,在I态中正趋势较弱,但河南、山东部分地区显著下降,负趋势系数超过0.5,负增长速率为 $-0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,表明这些地区极端高温事件的强度主要集中于阈值附近. II态中夏季极端高温事件强度呈正趋势的区域增大但仅在青海南部地区呈显著正趋势,趋势系数达0.7,增长速率达 $0.56\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,而呈显著负趋势的区域明显减少. III态中夏季极端高温事件强度呈显著正趋势的区域继续增加,集中于内蒙古、甘肃、青海、西藏干旱半干旱地区以及新疆东南部、长江沿岸以及长江三角洲和东南沿海地区.

冬季极端低温事件强度趋势的区域分布特征没有夏季明显. I态中低温强度在内蒙古中部显著

降低,负趋势系数超过0.5,负增长速率达 $-0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$. 全国大部分地区在II态呈负趋势,只有内蒙古中南部、东北部部分地区显著降低. III态中则在西藏西南、云南、青海部分地区显著降低,负趋势系数达 -0.6 ,负增长速率为 $-0.51\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$.

综上所述,夏季极端高温事件的强度在1961—1990年间(I态)的华北、黄淮流域显著降低,在1981—2009年间(III态)的干旱半干旱以及经济发达的长江沿岸、长江三角洲以及东南沿海地区显著升高,这与钱永甫等^[8,21,22]研究结果一致. 冬季极端低温事件的强度整体呈减少趋势,但区域特征不明显. 综合比较图5和图6可知,极端温度事件的频次和强度在空间上具有较好的一致性,在极端温度事件频次增加的区域,极端温度事件强度也增加,反之亦然,说明显著超过阈值的、极端性强的极端温度事件较少.

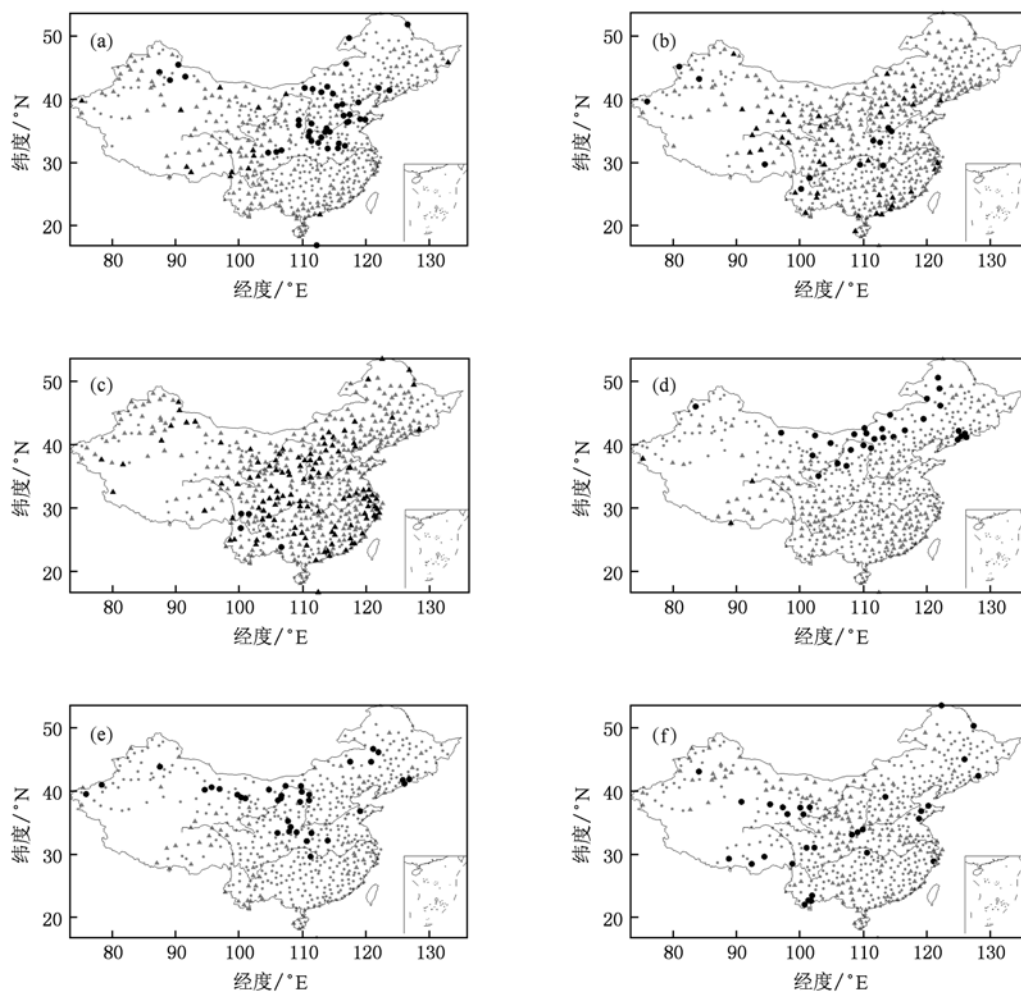


图6 夏季和冬季极端温度事件强度趋势系数分布图 (a),(b),(c)分别为夏季极端高温强度 I, II, III 态趋势系数分布图; (d),(e),(f)分别为冬季极端低温强度 I, II, III 态趋势系数分布图

5. 不同气候态下极端温度事件的时间演化

为了研究极端温度事件的时间演化规律,图7

和表1分别给出了不同气候态中国极端温度事件频次的变化情况和一阶回归系数. 表1中,中国夏季极端高温平均频次在II和III态显著上升,尤其是III态中频次的升高速率接近II态的三倍. 冬季极端低温频次在I态呈弱下降趋势,在II态显著

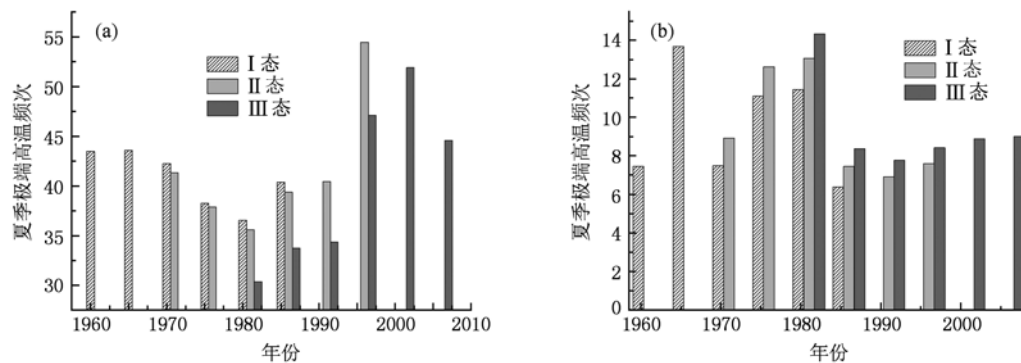


图7 极端温度事件频次随时间演化

降低,而Ⅲ态降低的速率有所减缓.由图7可知,夏季极端高温频次在Ⅰ态呈下降趋势,主要因为1971—1980年间频次明显减少.Ⅱ态中频次在1971—1985年逐渐减少,1996—2005年显著增加,使得Ⅱ态的回归系数整体呈增加趋势.Ⅲ态中冬季极端低温频次逐渐增加,其中在1996—2009年增加显著,使得Ⅲ态中频次的增长速率达2.35次/10 a.在三个气候态的重叠时段内,极端高温频次在后一气候态均比前一气候态少,其中Ⅰ,Ⅱ态频次比较接近,而Ⅱ,Ⅲ态频次相差较大,其直接原因是阈值的变化,根本原因是背景温度随气候态在逐渐升高.

表1 不同气候态极端温度事件平均频次回归系数(单位:次/10 a)

	Ⅰ态	Ⅱ态	Ⅲ态
夏季极端高温	-0.62	0.81	2.35
冬季极端低温	-0.45	-1.49	-1.14

可以认为,Ⅰ态冬季极端低温频次呈弱降低趋势.Ⅱ态在1971—1985年低温频次逐渐增多,1986—2000年变化较平缓.Ⅲ态在1981—1985年频次较高,1986—2009年变化平缓.1981—1985年Ⅱ,Ⅲ态中低温频次发生均达最高.在共同时间段内,后一气候态检测出的极端低温频次均比前一气候态多.

候态多.

综上所述,夏季极端高温频次在1975—1986年明显减少,冬季极端低温频次在1971—1980年显著增多,这与20世纪70年代末80年代初气候突变可能有关^[23].夏季极端高温频次在1996年后明显增多,冬季极端低温频次在1986年后变化比较平缓,说明目前夏季发生极端高温比较频繁,冬季极端低温的发生维持在一个稳定状态.

图8和表2分别给出了极端温度事件全国平均强度随时间演化规律和一阶回归系数.表2说明夏季极端高温强度在Ⅱ,Ⅲ态中呈正增长趋势,而中Ⅲ态中的增加速率为Ⅱ态的四倍.冬季极端低温强度均呈减小趋势,Ⅱ态中下降速率较大,Ⅲ态中下降速率有所减缓且小于Ⅰ态.分析图8可知,夏季极端高温强度在Ⅰ态中呈弱降低趋势,但在1981—1985年强度下降明显.Ⅱ态中极端高温强度整体上升趋势不明显,主要有1981—1985年、1991—1995年两个下降时段.Ⅲ态中极端高温强度升高趋势明显,尤其自1996年后的15年强度显著增强.三个气候态共同时段内,后一气候态检测出的极端高温强度均比前一气候态小.Ⅰ,Ⅱ态中极端高温强度较接近,Ⅲ态与Ⅱ态相差较大,这可能与不同气候态背景温度的变化有关.

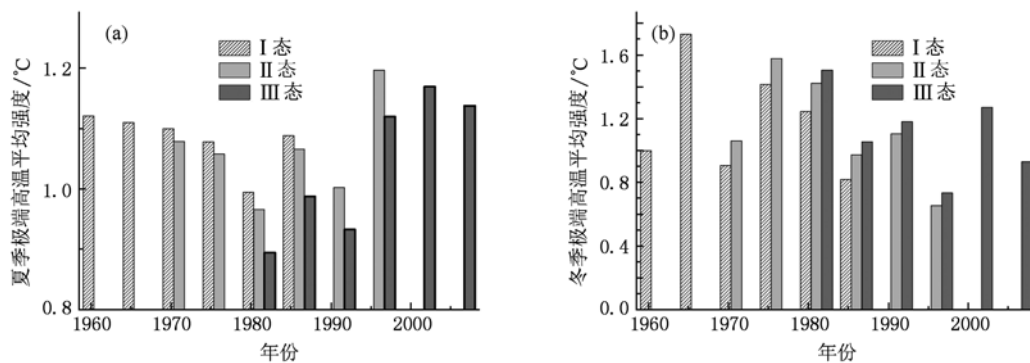


图8 极端温度事件强度随时间演化

表2 不同气候态极端温度事件平均强度回归系数(单位:°C/10 a)

	Ⅰ态	Ⅱ态	Ⅲ态
夏季极端高温	-0.04	0.03	0.12
冬季极端低温	-0.07	-0.19	-0.04

冬季极端低温强度在Ⅰ态中无明显下降趋势,但在Ⅱ态中下降趋势显著,强度降低速率超过Ⅰ态的两倍,Ⅲ态中强度降低速率较Ⅱ态有所减缓且小于Ⅰ态下降速率.

由极端温度强度的定义知道,强度的大小从一个侧面反映了极端温度的极端性.综合分析可知,夏季极端高温的极端性随气候态逐渐增强,而冬季极端低温的极端性越来越小,即夏季发生超过阈值较大极端高温事件逐渐增加,如高温热浪事件等;冬季发生阈值附近极端低温事件较多,使得冬季总体温度增加显著,这与气候变暖的背景是相一致的.比较图7和图8可知,极端温度事件的频次与强度在时间变化趋势上存在较好的一致性.夏季极

端高温强度在 1975—1986 年为明显的低值时段、冬季极端低温强度在 1971—1980 年为显著高值时段,这与 20 世纪 70 年代末 80 年代初气候突变时段相一致^[23]. 夏季极端高温强度变化范围在 0.8—1.2 °C,冬季极端低温强度在 0.6—1.8 °C,夏季极端性相对比冬季小. 目前夏季极端高温强度有增强趋势,冬季极端低温强度比突变时段明显降低,且变化平缓,说明夏季极端高温的极端性在增加,冬季相对比较稳定.

虽然本文气候态的选取在有 10 年的重叠,但由于本文极端事件阈值是基于观测数据的概率密度函数所得到,所以这 10 年的重叠期不影响极端事件在不同时期的比较分析. 综合图 7 和图 8 可以看出,随着全球增暖,极端高温事件的频次先下降再上升,在 20 世纪 70 年代末 80 年代初三个气候态均达到最低值,而极端低温事件的频次总体无明显变化趋势,总体略有下降且在 20 世纪 70 年代末 80 年代初三个气候态均较高;极端高温事件的强度变化不大,20 世纪后半叶至今的极端温度事件的强度总体上与 20 世纪中期持平,同样三个气候态都在 20 世纪 70 年代末 80 年代初达到最低值;极端低温事件的强度总体呈下降趋势,三个气候态都在 20 世纪 70 年代末 80 年代初达到最大值;众所周知,在 20 世纪 70 年代末 80 年代初,全球气候系统发生了一次突变,通过对比发现,在突变前,极端高温事件的频次具有明显的下降趋势,而在突变后则是明显的上升趋势,而极端低温事件在突变前后的发生频次大致相当;突变前极端高温事件的强度表现出轻微的下趋势,而在突变后上升趋势明显,极端低温事件在突变前后的强度大致相当,突变后的整体强度稍低于突变前.

6. 结 论

本文基于偏态概率密度函数定义极端温度事件,研究了不同气候态夏季和冬季极端温度事件阈值、频次和强度的空间分布特征和时间演化规律.

极端温度阈值与背景温度关系密切,背景温度较高区域,其相应的极端温度阈值就较高,反之亦然. 自 1961 年以来,中国极端高温事件的阈值在背景温度不太高的内蒙古地区上升明显,在背景温度比较高的中国黄河以南的南方地区下降,尤其是黄淮流域近 50 年来一直具有显著下降趋势;极端低温

阈值在中国大部地区均为上升趋势,尤其是在中国北方,但在 2000 年后上升趋势变缓. 其中,在 1971—2000 年中尤其是在 1990—2000 年间,中国极端高温事件的阈值具有明显的上升趋势;极端低温阈值在中国北方显著升高,在青藏高原东部及西南西部地区明显降低. 在 1981—2009 年中,极端高温阈值和极端低温阈值基本无显著差异,黄淮、内蒙古东部和东北东部地区在 2000 年之后变化较大. 以上结果表明,极端温度阈值均在背景温度不太高的区域变化显著,在背景温度较高区域无明显变化甚至下降,最近气候态极端温度阈值整体变化相对比较平缓.

中国夏季极端高温频次,1961—1990 年间在黄淮流域显著减小,1981—2009 年尤其是 20 世纪 90 年代以来,在干旱半干旱以及长江沿岸、长江三角洲以及东南沿海的经济发达地区显著增加. 冬季极端低温频次,1971—2000 年间尤其是 20 世纪 90 年代在北方、长江三角洲,以及 1981—2009 年间尤其是 20 世纪 90 年代以来的青藏高原、东北东南部、长江三角洲地区显著降低. 夏季极端高温事件的强度在 1961—1990 年间的华北、黄淮流域显著降低,在 1981—2009 年间的干旱半干旱以及经济发达的长江沿岸、长江三角洲以及东南沿海地区显著升高. 冬季极端低温事件的强度整体呈减少趋势,但区域特征不明显.

时间演化上,夏季极端高温频次在 1975—1986 年明显减少、冬季极端低温频次在 1971—1980 年显著增多. 夏季极端高温频次在 1996 年后明显增多,冬季极端低温频次在 1986 年后变化比较平缓. 夏季极端高温强度在 1961—1990 年呈弱降低趋势,但在 1981—1985 年强度下降明显. 1971—2000 年间极端高温强度整体上升趋势不明显,主要有 1981—1985 年、1991—1995 年两个下降时段. 在 1971—2000 年,极端高温强度升高趋势明显,尤其自 1996 年后的 15 年强度显著增强. 在 I, II, III 态共同时段内,后一气候态检测出的极端高温频次均比前一气候态少,极端低温频次均比前一气候态多,这与背景温度随气候态逐渐升高是相一致的;后一气候态检测出的极端高温强度均比前一气候态小,极端低温强度均比前一气候态大. 总之,最近气候态夏季极端高温频次与强度均在经济发达区域显著增加,这可能与城市热岛效应有关;冬季极端低温频次与强度均趋于平缓变化状态.

夏季极端高温强度在 1975—1986 年为明显的低值时段,冬季极端低温强度在 1971—1980 年为显著高值时段,夏季极端性相对比冬季小. 当前夏季

极端高温强度有增强趋势,冬季极端低温强度比突变时段明显降低且变化平缓,说明夏季极端高温的极端性在增加,冬季相对比较稳定.

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J 2007 *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press) p156
- [2] Qin D H 2002 *Evaluation of Environment Evolvement over the Western China; Assesment on Environment Evaluation over Western China* (Beijing ;Science Press) p2 (in Chinese)[秦大河 2002 中国西部环境演变评估:中国西部环境演变评估综合报告(北京:科学出版社)第2页]
- [3] IPCC 2007 *Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report* (Cambridge : Cambridge University Press) p10
- [4] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P M 2002 *Clim. Res.* **19** 193
- [5] Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R 2001 *Int. J. Climatol.* **21** 269
- [6] Zhai P M, Pan X H 2003 *Act. Geo. Sin.* **58** 1 (in Chinese)[翟盘茂、潘晓华 2003 地理学报 **58** 1]
- [7] Pan X H, 2002 *The Study of Extreme Temperature and Rainfall about 50 Years in China* (Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences) (in Chinese) [潘晓华 2002 近五十年中国极端温度和降水事件变化规律研究(北京:中国气象科学研究院)]
- [8] Qian Y F, Huang D Q 2008 *Act. Scientiarum Naturalium Univeisitatis Sunyatseni* **47** 113 (in Chinese) [钱永甫、黄丹青 2008 中山大学学报(自然科学版) **47** 113]
- [9] Sun Z B, Zhang N 2008 *J. Nanjing Institute of Meteorology* **31** 123 (in Chinese)[孙照渤、张 宁 2008 南京气象学院学报 **31** 123]
- [10] Yang P, Liu W D, Wang Q G 2010 *J. Applied Meteo. Sci.* **21** 29 (in Chinese) [杨 萍、刘伟东、王启光 2010 应用气象学报 **21** 29]
- [11] Gong Z Q, Wang X J, Zhi R 2009 *Act. Phys. Sin.* **58** 6 (in Chinese) [龚志强、王晓娟、支 蓉 2009 物理学报 **58** 6]
- [12] Redner S, Petersen M R 2006 *Phys. Rev. E* **74** 1114
- [13] Wu X, Ding Y G, Zhou H P 1995 *Sci. Meteo. Sin.* **15** 281 (in Chinese) [吴 息、丁裕国、周会平 1995 气象科学 **15** 281]
- [14] Liu X H, Wang L J, Wu H B 2007 *Clim. and Envi. Res.* **12** 780 (in Chinese)[刘兴华、王立静、吴洪宝 2007 气候与环境研究 **12** 780]
- [15] Liu J C, Qian H S 2000 *J. Henan Polytechnic University*(Natural Science) **30** 84 (in Chinese) [刘军臣、千怀遂 2000 河南大学学报(自然科学版)**30** 84]
- [16] Qian Z H, Feng G L, Gong Z Q 2010 *Act. Phys. Sin.* **59** 7490 (in Chinese)[钱忠华、封国林、龚志强 2010 物理学报 **59** 7490]
- [17] Shi N, Huang X X, Y Y 2003 *Sci. Atmos. Sin.* **27** 971 (in Chinese) [施 能、黄先香、杨 扬 2003 大气科学 **27** 971]
- [18] Wang Y, Shi N, Gu J Q 2006 *Sci. Atmos. Sin.* **30** 162 (in Chinese) [王 颖、施 能、顾骏强 2006 大气科学 **30** 162]
- [19] Ding Y G, Jiang Z H 2009 *Introduction of Research Approaches about extreme climatic* (Beijing: Metrological Press) p19 (in Chinese)[丁裕国、江志红 2009 极端气候研究方法导论(北京:气象出版社)第19页]
- [20] Wang Z C 2008 *Statistic and Thermodynamic Physics* (fourth edition) (Beijing: China Higher Education Press) p256 (in Chinese) [汪志诚 2008 热力学统计物理(第四版)(北京:高等教育出版社)第256页]
- [21] Yu S Q, Lin X C 1997 *J. Trop. Metro.* **13** 266 (in Chinese) [于淑秋、林学椿 1997 热带气学报 **13** 266]
- [22] Feng G L, Dong W J 2003 *Chin. Phys.* **12** 1076
- [23] Lin X C 1998 *Climate Change and Its Influence at the End of the 1970s and Beginning of the 1980s* (Beijing: Metrological Press) p15 (in Chinese) [林学椿 1998 70年代末、80年代初气候跃变及其影响,东亚季风和 中国暴雨(北京:气象出版社)第15页]

Characteristics of spatiotemporal distribution of extreme temperature events over China mainland in different climate states against the backdrop of most probable temperature *

Qian Zhong-Hua¹⁾ Hou Wei²⁾ Yang Ping³⁾ Feng Guo-Lin^{1)2)†}

1) (Department of Physics Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

2) (National Climate Center, Beijing 100081, China)

3) (Institute of Urban Meteorology, China Metrology Administration, Beijing 100089, China)

(Received 24 November 2010; revised manuscript received 5 January 2011)

Abstract

Daily max temperature records of National Meteorological Information Center from 1961 to 2009 over China mainland are divided into three climate states of 1961—1990, 1971—2000, 1981—2009 (just called State I, State II, State III respectively). Most probable temperature (MPT) and extreme temperature events are defined according to the skewed function. The spatiotemporal distribution characteristics of frequency and strength of extreme temperature events over China mainland in different climate states against the backdrop of MPT are analyzed. Spatially, frequency and strength of extremely high temperature in summer decrease significantly in the Yangtze-Huaihe river valley and the Yellow river and Huaihe River valley in State I and increase significantly in the arid-semiarid region and the economically developed Yangtze River delta in State III. The frequency of extremely low temperature in winter reduces remarkably in the north part and the Yangtze River delta in State II and in the Qinghai-Tibet Plateau, the southeast part of northeast China, the Yangtze River delta in State III. The strength of extremely low temperature in winter reduces on the whole and provincial characteristics are not obvious. The frequency and the strength of extreme temperature events are consistent spatially. Temporally, the frequency and the strength of extremely high temperature in summer increase obviously both in State II and State III. The frequency and the strength of extremely low temperature in winter reduce obviously in State II and the reducing trend slows down in State III. Extremely high temperature in summer occurs frequently and extremely low temperature in winter remains stable. Extremity of high temperature in summer is stronger while in winter is stable relatively. The frequency and the strength of extreme temperature events are consistent temporally. During the common time period of States I, II and III, the frequency of extremely high temperature events in the last state was always less than the former while the low temperature events are more, which is in accordance with the fact that the background temperature steps up with the states; the strength of extremely high temperature events in the latter state is less than that of the former while the strength of extremely low temperature events is stronger. For the abrupt change of climate at the end of the 1970s and the beginning of the 1980s, the frequency of extreme high temperature events decreases before the change and increases obviously after the change while the ones of extremely low temperature do not change significantly correspondingly; the strength of extremely high temperature events decreased slightly before the change and increases obviously after the change while the strength of extremely low temperature does not change significantly for the change but the whole strength after the change is slightly lower than the one before the change.

Keywords: extreme high temperature, extreme low temperature, climate states

PACS: 92.70.Aa

* Project supported by the National Natural Science Foundations of China (Grant Nos. 41005043, 40930592), the State Key Program of Science Technology of China (Grant Nos. 2007BAC29B01, 2009BAC51B04), and the Global Change research of Major National Scientific Research Plan of China (Grant No. 2010CB950504).

† Corresponding author. E-mail: fenggl@cma.gov.cn