

董旭光,周强,刘焕彬,等.山东夏季极端热事件变化特征分析[J].海洋气象学报,2020,40(3):60-76.  
DONG Xuguang, ZHOU Qiang, LIU Huanbin, et al. Analysis on spatio-temporal characteristics of summer extreme hot events in Shandong from 1961 to 2019[J].Journal of Marine Meteorology,2020,40(3):60-76. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.007.(in Chinese)

## 山东夏季极端热事件变化特征分析

董旭光<sup>1</sup>,周强<sup>2</sup>,刘焕彬<sup>1</sup>,邱璨<sup>1</sup>,高理<sup>1</sup>,曹洁<sup>1</sup>

(1.山东省气候中心,山东 济南 250031;2.山东省气象服务中心,山东 济南 250031)

**摘要:**利用山东88个气象站1961—2019年夏季6—8月逐日最高、最低气温观测数据,分析了山东各地极端热昼、极端热夜、极端高温日三个极端热事件的时空演变规律和突变特征。结果表明:1)山东夜间出现极端热事件及白天和夜间同时出现极端热事件的天数增多、强度增强、占比增加。历年极端热昼出现天数和占比均呈不同程度的减少趋势,平均强度呈减小趋势,其中占比减少最明显;极端热夜、极端高温日出现天数和占比均呈不同程度的增加趋势,平均强度呈增强趋势。2)山东内陆和沿海地区各极端热事件变化差异明显。内陆地区极端热昼各指标减少、减小趋势更显著,大部分地区变化趋势通过了0.05的显著性水平检验,半岛南部和东部部分区域则有增加、增强趋势;中西部地区极端热夜各指标增加、增强趋势更显著,大部分地区变化趋势通过了0.05的显著性水平检验;中东部区域尤其是半岛地区极端高温日各指标增加、增强趋势更显著,大部分地区变化趋势通过了0.05的显著性水平检验。3)各极端热事件不同指标的突变情况迥异。极端热昼历年出现天数没有发生突变,平均强度在1970年前后发生突变,突变发生后,平均强度明显减小;极端热夜出现天数和平均强度均在1994年前后发生突变,突变发生后,出现天数明显增加、平均强度明显增强;极端高温日出现天数和强度分别在1994年、1973年前后发生突变,突变发生后,出现天数明显增加。

**关键词:**极端热事件;百分位阈值;时空变化;突变特征;山东

**中图分类号:** P412 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)03-0060-17

**DOI:**10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.007

## Analysis on spatio-temporal characteristics of summer extreme hot events in Shandong from 1961 to 2019

DONG Xuguang<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>2</sup>, LIU Huanbin<sup>1</sup>, QIU Can<sup>1</sup>, GAO Li<sup>1</sup>, CAO Jie<sup>1</sup>

(1. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China; 2. Shandong Meteorological Service Center, Jinan 250031, China)

**Abstract** Based on the observation data of daily maximum and minimum temperature between June and August from 1961 to 2019 from 88 meteorological stations in Shandong, the spatio-temporal variation and mutation characteristics of the extreme hot daytime, extreme hot nighttime, extreme hot days are analyzed using three extreme temperature indices. The results are shown below. 1) The number of extreme hot events that happened in the nighttime and happened both in the daytime and nighttime increases with stronger intensity and higher frequency. The annual frequency, proportion, and mean intensity of extreme hot daytime have decreasing tendency, and the decreasing tendency of proportion is the most significant;

收稿日期:2020-04-13; 修订日期:2020-05-14

基金项目:中国气象局气候变化专项(CCSF202037);山东省气象局研究项目(2018sdqxz03,2018sdqxm22)

作者简介:董旭光,男,正高级工程师,主要从事气候变化和气候应用研究工作,dongxugg@sina.com。

通信作者:刘焕彬,男,高级工程师,主要从事气候应用研究工作,hb\_liu@126.com。

the annual frequency, proportion, and mean intensity of extreme hot nighttime and extreme hot days have increasing tendency. 2) The variations of extreme hot events in inland and coastal regions of Shandong are obviously different. The indices of extreme hot daytime have significantly decreasing tendency in inland areas and the variation tendency in most areas passes the significance test at 0.05 level, while the indices have increasing tendency in some areas of the south and east of Shandong Peninsula; the indices of extreme hot nighttime have significantly increasing tendency in the middle and west of Shandong and the variation tendency in most areas passes the significance test at 0.05 level; the indices of extreme hot days have significantly increasing tendency in the middle and east of Shandong, especially in Shandong Peninsula, and the variation tendency in most areas passes the significance test at 0.05 level. 3) The mutations of the extreme hot events' indices are varied. For extreme hot daytime, the frequency does not mutate, the mean intensity mutates around 1970, and the mean intensity have obviously decreased since the mutation; for extreme hot nighttime, the frequency and mean intensity both mutate around 1994, and the frequency and mean intensity have obviously increased since the mutation; for extreme hot days, the frequency and intensity mutate around 1994 and 1973, respectively, and the frequency has obviously increased since the mutation.

**Key words** extreme hot event; percentile threshold; spatio-temporal variation; mutation; Shandong

## 引言

夏季的极端高温会增加心血管、呼吸道、消化道等疾病的发生率,尤其对老年人的不利影响更明显。2003年夏季欧洲出现了破历史极值记录的高温热浪事件,短期内造成上万人死亡,经济损失达13亿美元<sup>[1-2]</sup>。2009—2011年北京市发生的5次高温热浪事件中,对循环系统疾病急诊就诊人数影响最大,最高气温升高1℃,携带总循环系统疾病的病人就诊人数的优势比(odds ratio, OR)为1.834<sup>[3]</sup>。OR值大于(小于)1,表明携带总循环系统疾病的人患病的风险高(低)。

近年来,国内外学者针对极端气温事件的研究已经取得了丰富的成果。翟盘茂和潘晓华<sup>[4]</sup>对中国北方极端气温研究表明,中国最低气温增暖趋势显著,北方地区白天温度极端偏高日数增多,夜间温度极端偏低日数减少。同时在采用世界气象组织(WMO)气候委员会与CLIVAR计划联合设立的气候变化检测、监测和指标专家组(ETCCDI)定义的极端气温指数对不同区域极端气温变化特征进行分析研究方面,已经得到了诸多明确的研究结论。这些指标意义明确且易于计算,已被广泛地应用在模式评估<sup>[5-6]</sup>、气候变化归因和预测<sup>[7-9]</sup>、气候变化趋势<sup>[10-12]</sup>、未来极端气温的预估<sup>[13-15]</sup>等研究中。我国诸多学者也采用这些极端气温指数对全国不同区域的极端气温时空变化进行了详细的分析。研究结果表明,整个中国大陆<sup>[15-17]</sup>、中国东

部<sup>[18-19]</sup>、淮河流域<sup>[20-21]</sup>、长江流域<sup>[22]</sup>、黄河流域<sup>[23]</sup>、西南地区<sup>[24-25]</sup>、黄土高原<sup>[26]</sup>、华北地区<sup>[27-28]</sup>等不同区域极端气温均有不同程度的上升趋势,但极端最低气温上升幅度高于极端最高气温,冷指数明显减少而暖指数明显增加。现有的暖昼(暖夜)等极端气温指数通常指日最高(最低)气温超过规定阈值的极端气候事件,其中暖昼(暖夜)均包含了仅白天(夜间)出现极端热事件和白天夜间同时出现极端热事件的情况。若极端热事件仅在白天出现,对人们的日常生活和生态系统会造成较大的影响,但气温相对较低的夜晚则会缓解极端热事件的不利影响<sup>[29]</sup>;若极端热事件仅在夜间出现,而白天气温相对较低,其不利影响会明显减弱<sup>[30]</sup>;若白天和夜间同时出现极端热事件,不利影响会显著增强,能源消耗显著增加<sup>[31]</sup>。将白天和夜间的极端气温分为三种类型进行统计:极端热昼(仅白天出现极端热事件,夜间不出现极端热事件)、极端热夜(仅夜间出现极端热事件,白天不出现极端热事件)、极端高温日(白天和夜间同时出现极端热事件),研究其时空演变规律及与现有极端气温指标的异同是一件有意义的研究项目。

山东地处我国中东部沿海,属暖温带季风气候区,区域内下垫面特征复杂,受海陆位置和地形地貌差异的影响,各地不同时间尺度气温变化存在明显差异。于凤硕等<sup>[32]</sup>的研究结果表明,山东冷暖指数变化趋势的方向和大小均表现出明显的不对称性,暖(冷)指数表现为增加(减少)趋势显著。山东

的夏季异常高温出现概率有所增加<sup>[33]</sup>。山东气温增暖趋势明显,最低气温的上升幅度更显著<sup>[34]</sup>,平均极端低温(高温)日有明显减少(增加)趋势<sup>[35]</sup>。虽然前期关于山东的极端气温变化研究取得一些成果,但未见极端热昼、极端热夜、极端高温日等三种极端热事件参数的研究成果。因此,本文通过定义三个极端热事件,对山东区域极端热事件进行更为精细的分类评估,研究其时空演变规律和突变特征。另外,采用 ETCCDI 定义的暖昼、暖夜指数与本文分析的三类极端热事件进行对比分析,从而进一步丰富极端气温变化的研究成果。

## 1 数据与方法

### 1.1 使用的数据

文中使用了山东 122 个国家级气象观测站(不包括泰山气象观测站)1961—2019 年 6—8 月逐日最高、最低气温观测数据,气温数据来源于山东省气象信息中心。为了保证气温数据真实有效,进一步进行了气温数据的气候极值检验、时间一致性和空间一致性检验,保证历年夏季逐日最高、最低气温总数据量达 95% 以上。另外剔除了观测站迁移超过 20 km 的站点和夏季日最高气温 97 分位阈值低于 29.0 °C 的站点<sup>[36]</sup>。同时考虑到气象站气温观测数据的时间序列长度和完整性,最终确定 88 个气象站气温数据作为研究对象。选取的气象站点和地形空间分布见图 1。

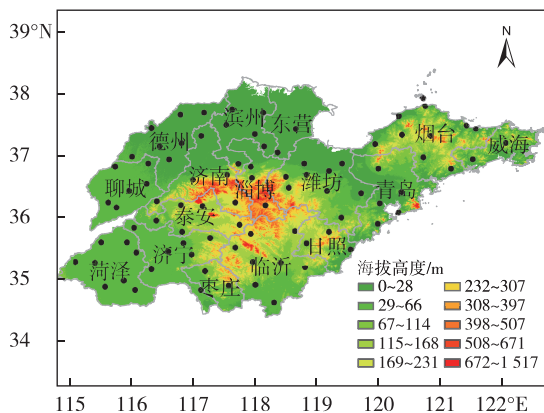


图1 山东地形特征及使用的气象观测站点空间分布  
Fig.1 Topographic features and distribution of used meteorological observation stations in Shandong

### 1.2 研究方法

极端天气气候事件的阈值主要包括绝对阈值和相对阈值。根据中国气象局的规定,当日最高气温  $t \geq 35.0$  °C 时,定义为高温日<sup>[37-38]</sup>,即为高温的

绝对阈值。对于山东内陆地区,超过日最高气温绝对阈值的样本量较多,分析结果具有较好的统计意义,但对于沿海地区,超过日最高气温绝对阈值的样本量较少或没有出现,分析结果代表性较差,同时考虑到山东海陆位置、气候差异和人们对当地气候的长期适应性,不同地区人们对高温的耐受程度明显不同。因此,针对不同地区高温特征的显著差异,利用概率统计方法分析得到极端阈值(称为相对阈值),分析超过极端阈值的出现天数、强度等指标的变化特征,是研究极端气候事件变化的常用方法。因此,本文采用百分位法定义极端阈值,当某日最高气温或最低气温超过该极端阈值时,即该日出现了极端热事件。

文中设定三个极端热事件进行分析,分别为极端热昼、极端热夜、极端高温日,极端热昼定义为日最高气温超过设定的日最高气温极端阈值,而日最低气温低于设定的日最低气温极端阈值;极端热夜定义为日最高气温低于其极端阈值,而日最低气温超过其极端阈值;极端高温日定义为日最高气温和日最低气温均超过各自的极端阈值。

采用三个分析指标进行各极端热事件的时空变化特征研究,分别为极端热事件出现天数(d)、强度(°C)、占比(%),出现天数为各站极端热事件在夏季 6—8 月一共出现的天数,全省平均出现天数为各站的平均值;强度为各站极端热事件偏离相应阈值的程度,各站极端热昼强度为日最高气温超过阈值的数值,各站极端热夜强度为日最低气温超过阈值的数值,各站极端高温日强度为日最高、最低气温分别超过相应极端阈值的合计数;占比统计为各类极端热事件出现天数占所有极端热事件出现天数的百分比。

在研究各极端热事件不同指标的长期变化特征时,采用最小二乘法计算线性趋势<sup>[39]</sup>,并对变化趋势进行显著性水平检验,趋势系数为正(负),代表增加(减小)趋势。采用反距离加权(inverse distance weighted, IDW)插值法对各极端热事件的指标分析结果进行插值<sup>[40]</sup>。采用累积距平<sup>[41]</sup>、Mann-Kendall(M-K)非参数突变检验<sup>[39]</sup>、滑动 T 检验<sup>[39]</sup>、Yamamoto 检验<sup>[42]</sup>等方法综合分析极端热事件出现天数和平均强度的突变特征。

## 2 结果分析

### 2.1 不同强度日极端气温特征

由表 1 可知,山东各地日最高气温第 90 分位阈

值在 28.1~33.0 °C 之间,平均为 31.7 °C,超过阈值标准天数的出现频率为 9.2%。日最低气温第 90 分位阈值在 20.9~23.5 °C 之间,平均为 22.2 °C,超过阈值标准天数的出现频率为 10.3%。日最高、最低极端气温阈值相对较低而出现频率较多,不能较好地代表区域极端气温特征。第 97、98、99 分位日最高气温阈值最大值均超过 35.0 °C,超过阈值标准天数的出现频率分别为 2.9%、1.9%、1.0%。日最低气温阈值最大值均超过 25.9 °C,超过阈值标准天数

的出现频率分别为 3.4%、2.3%、1.3%。日最高、最低极端气温阈值相对较高而出现频率较少,其极端气温阈值过于严格,作为极端气温的气候统计意义较差。超过第 95 分位日最高、最低气温阈值标准天数的出现频率分别为 4.7%、5.4%,日最高气温接近 35.0 °C,日最低气温为 25.0 °C,其极端气温指标具有较好的代表性。因此,选用第 95 分位日最高、最低气温阈值作为山东各地极端气温标准。

表 1 不同百分位日最高、最低气温阈值

Table 1 Daily maximum and minimum temperature thresholds at different percentiles in Shandong

百分位	日最高气温阈值/°C			出现频率/%	日最低气温阈值/°C			出现频率/%
	最大值	最小值	平均值		最大值	最小值	平均值	
90	33.0	28.1	31.7	9.2	23.5	20.9	22.2	10.3
95	34.5	29.5	33.3	4.7	25.0	22.6	23.8	5.4
97	35.5	30.2	34.2	2.9	25.9	23.4	24.6	3.4
98	36.2	30.8	34.8	1.9	26.6	23.9	25.1	2.3
99	37.1	31.7	35.7	1.0	27.6	24.6	25.9	1.3

2.2 日最高、最低气温阈值空间分布

受海陆位置、下垫面特征等影响,山东日最高气温阈值大致呈内陆高、沿海低的空间分布型,日最低气温阈值与最高气温阈值空间分布类似,但沿海地区与内陆地区的日最低气温阈值差值明显变小。山东中西部区域共 52 站日最高气温阈值在 33.6 °C 以上,邹平、济南等 5 站最高,为 34.5 °C,半岛东部和南部区域相对较低,共 6 站低于 30.5 °C,青岛最低,为 29.5 °C。内陆地区日最低气温阈值一般在 23.6 °C 以上,济南最高,为 25.0 °C,沿海地区一般低于 24.0 °C (图 2)。

2.3 极端热事件指标历年变化

2.3.1 出现天数

1961—2019 年山东各站历年平均各极端热事件出现天数变化见图 3,图 3 各子图中  $R$  为相关系数(下同)。山东各站历年平均极端热昼气候事件出现天数为 9.4 d,气候倾向率为  $-0.35 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,呈不显著减少的变化趋势,没有通过 0.05 的显著性水平检验,除 1968 年外,其他各年极端热昼出现天数均少于 20.0 d。山东夜间出现极端热事件和白天、夜间同时出现极端热事件的天数显著增加。历年平均极端热夜和极端高温日出现天数分

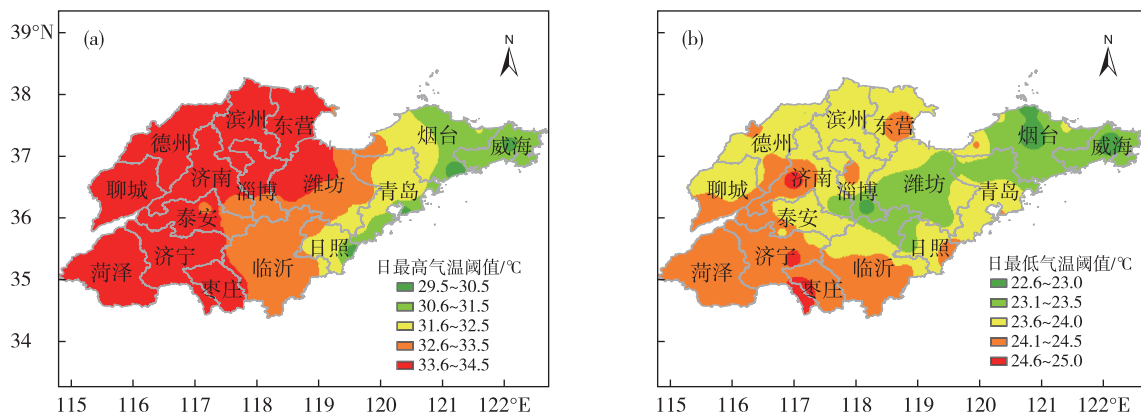


图 2 1961—2019 年山东各站日最高气温 (a)、日最低气温 (b) 第 95 分位阈值空间分布 (单位: °C)

Fig.2 Spatial distribution of the 95th percentile threshold of daily maximum (a) and minimum temperature (b) at different stations in Shandong from 1961 to 2019 (units: °C)

别为 10.7 d、7.9 d,均呈增加变化趋势,气候倾向率分别为  $0.92 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $1.20 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,变化趋势通过了 0.05 的显著性水平检验,增加趋势显

著。极端高温日增加趋势较极端热夜更为明显,极端热夜出现天数 2013 年最多,为 19.7 d,极端高温日则在 2018 年最多,为 25.3 d。

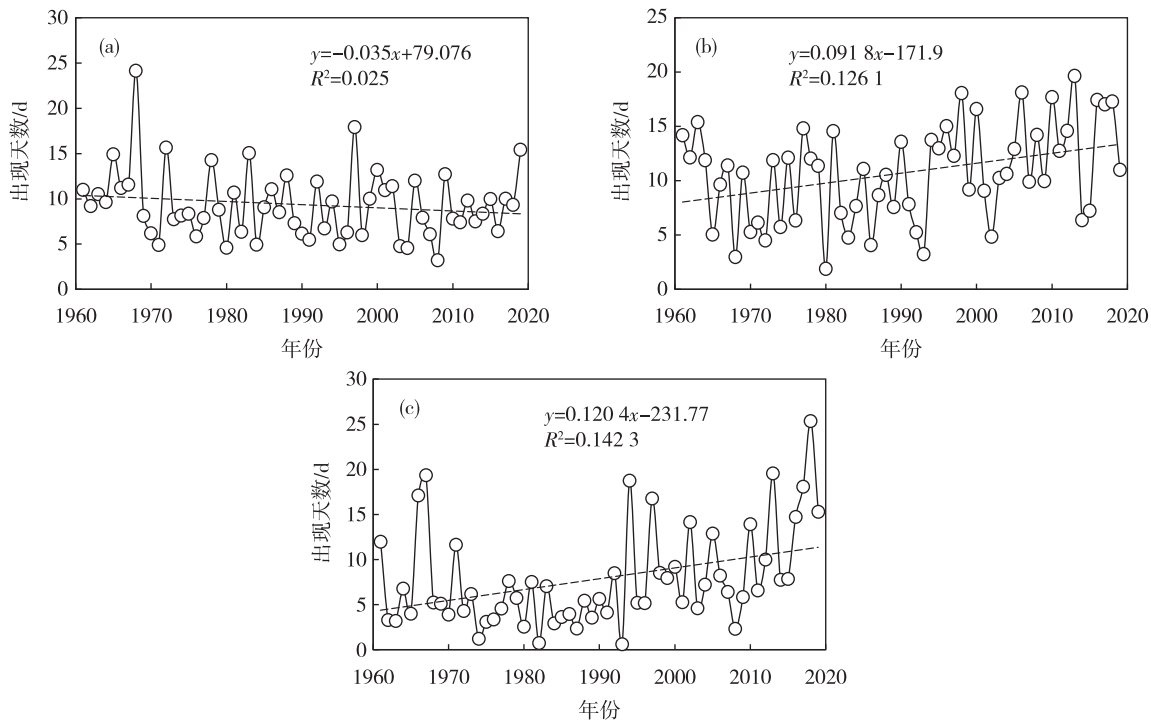


图3 1961—2019年山东各站极端热昼(a)、极端热夜(b)、极端高温日(c)平均出现天数(单位:d)历年变化

Fig.3 Annual variation of mean frequency (units: d) of extreme hot daytime (a), extreme hot nighttime (b), and extreme hot days (c) at different stations in Shandong from 1961 to 2019

### 2.3.2 平均强度

1961—2019年山东各站历年平均极端热事件强度变化与出现天数变化类似(图4)。历年平均极端热昼平均强度为  $1.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,呈减小变化趋势,未通过 0.05 的显著性水平检验,减小趋势不显著,其平均强度的气候倾向率为  $-0.04 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,除 1968 年外,其他各年极端热昼平均强度均小于  $2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。山东夜间出现极端热事件和白天、夜间同时出现极端热事件的强度增强。历年平均极端热夜和极端高温日平均强度分别为  $0.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,气候倾向率分别为  $0.04 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $0.16 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,均呈增强的变化趋势,变化趋势通过了 0.05 的显著性水平检验,增强趋势显著,极端高温日增加趋势较极端热夜更为明显。极端热夜平均强度 2018 年最大,为  $1.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端高温日则有 5 a 平均强度超过  $4.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.3.3 占比

由图 5 可见,三类极端热事件参数占比历年变化存在明显的年际差异,极端热昼出现天数占比呈明显的减少变化趋势,其气候倾向率为  $-3.10\%$  ·

$(10 \text{ a})^{-1}$ ,通过了 0.05 的显著性水平检验,减少趋势显著。极端热夜和极端高温日出现天数占比均呈增加的变化趋势,但增加趋势差异明显,极端热夜出现天数占比的气候倾向率为  $0.93\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,未通过 0.05 的显著性水平检验,增加趋势不显著,但极端高温日出现天数占比的气候倾向率为  $2.17\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,通过了 0.05 的显著性水平检验,增加趋势显著。极端热昼出现天数占比平均为 35.3%,从历年变化来看,1994 年以前,历年极端热昼出现天数占比多高于平均值,之后则多低于平均值。极端热夜出现天数占比平均为 38.8%,略高于极端热昼,2010 年以前,历年极端热夜出现天数占比波动较大。极端高温日出现天数占比平均为 25.8%,20 世纪 60 年代和 90 年代波动较大,2010 年以来,历年出现天数占比均高于平均值。

## 2.4 极端热事件指标空间分布与变化趋势

### 2.4.1 出现天数

由各极端热事件出现天数空间分布(图 6a、c、e)可见,鲁西北、鲁中南部、半岛中东部等部分区域是山东极端热昼平均出现天数较多的地区,超过



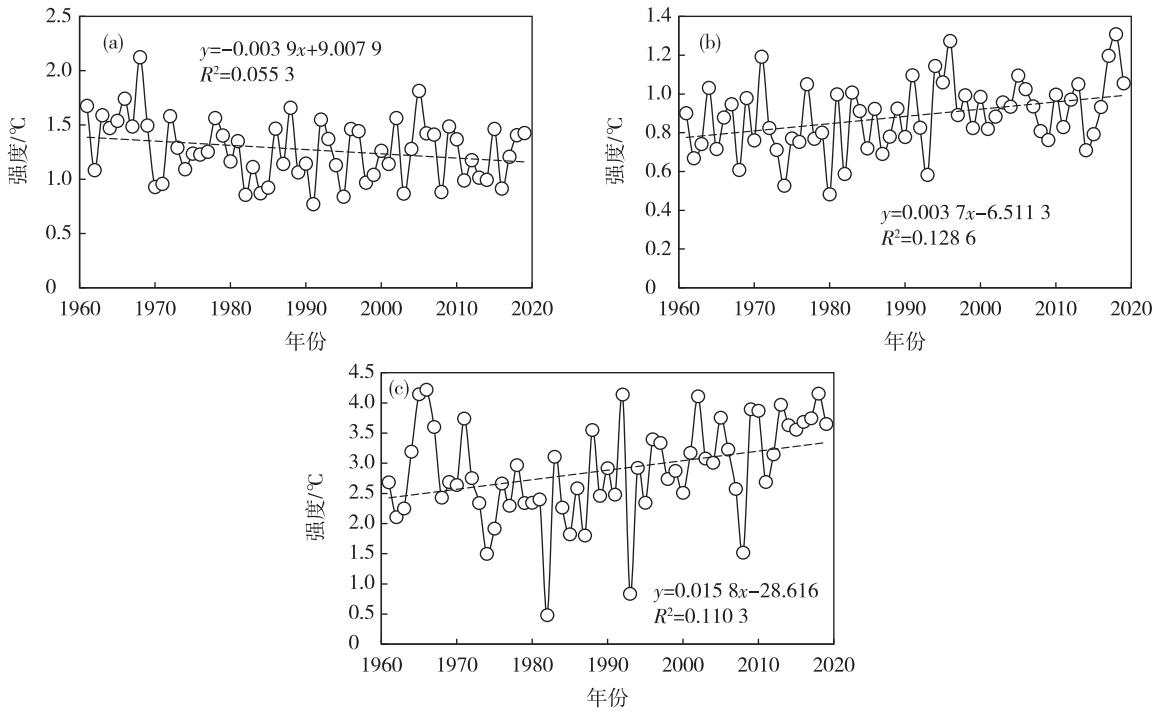


图4 1961—2019年山东各站极端热昼(a)、极端热夜(b)、极端高温日(c)平均强度(单位:°C)历年变化  
Fig.4 Annual variation of mean intensity (units: °C) of extreme hot daytime (a), extreme hot nighttime (b), and extreme hot days (c) at different stations in Shandong from 1961 to 2019

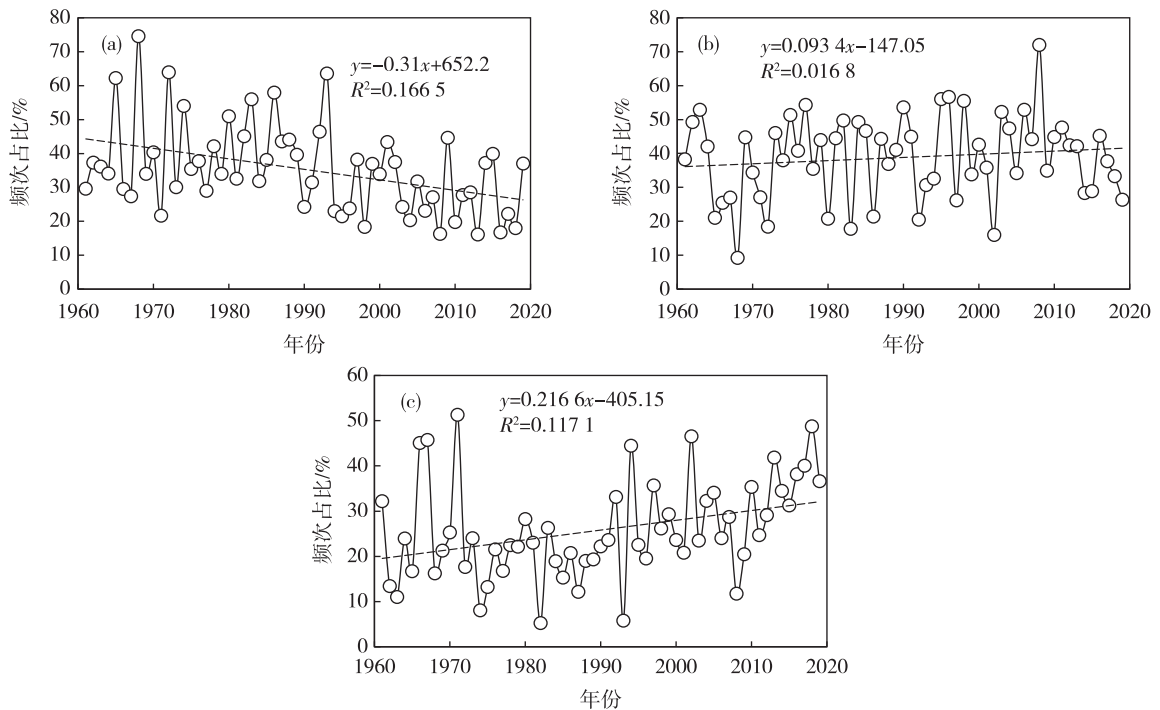


图5 1961—2019年山东各站极端热昼(a)、极端热夜(b)、极端高温日(c)平均占比(单位:%)历年变化  
Fig.5 Annual variation of mean proportion (units: %) of extreme hot daytime (a), extreme hot nighttime (b), and extreme hot days (c) at different stations in Shandong from 1961 to 2019

10.0 d;鲁南、鲁东南、半岛北部沿海地区相对较少, 低于9.0 d。极端热夜的空间分布与极端热昼类似,

鲁西北、鲁中、半岛中东部地区出现天数较多,超过 11.1 d;鲁南、半岛北部沿海等区域较少,少于 10.0

d. 极端高温日出现天数以鲁南、鲁中部分地区、鲁东南沿海、半岛北部沿海等部分地区出现较多,超

过 9.0 d。

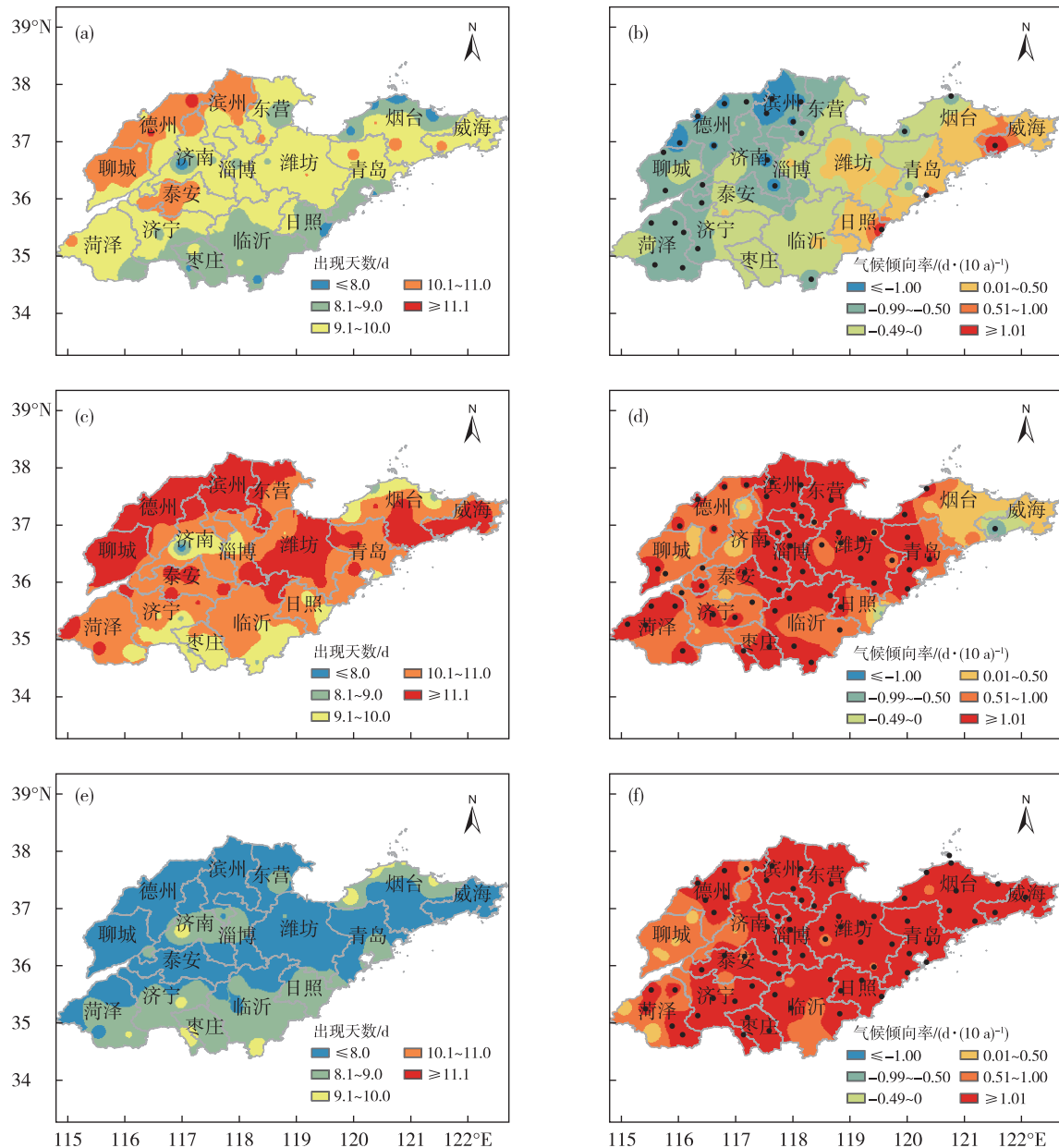


图6 1961—2019年山东各站极端热昼(a,b)、极端热夜(c,d)、极端高温日(e,f)出现天数空间分布(a,c,e,单位:d)和变化趋势(b,d,f,单位: $d \cdot (10 a)^{-1}$ ) (黑色圆点代表变化趋势显著的站点,通过了0.05的显著性水平检验,下同)

Fig.6 Spatial distribution (a, c, e, units: d) and variation tendency (b, d, f, units:  $d \cdot (10 a)^{-1}$ ) of frequency of extreme hot daytime (a, b), extreme hot nighttime (c, d), and extreme hot days (e, f) at different stations in Shandong from 1961 to 2019 (black dot for station of significant variation tendency that passes the significance test at 0.05 level, the same hereafter)

由各极端热事件出现天数空间变化趋势(图6b,d,f)可见,山东各站极端热昼出现天数变化趋势在 $-1.53 \sim 1.75 d \cdot (10 a)^{-1}$ 之间,呈减少变化趋势的站点主要出现在山东中西部区域,共65站,其中章丘、惠民、无棣等25站减少趋势显著,通过了0.05的显著性水平检验,减少趋势显著的站点主要

分布在鲁西北、鲁西南及半岛北部局部地区;呈增加变化趋势的站点主要出现在半岛东部和南部区域,共23站,其中仅青岛、乳山、日照3站增加趋势显著,通过了0.05的显著性水平检验,增加趋势超过 $1.00 d \cdot (10 a)^{-1}$ ,均位于半岛南部沿海地区。极端热夜出现天数变化趋势在 $-1.08 \sim 1.79 d \cdot (10 a)^{-1}$

$a)^{-1}$ 之间,全省除半岛东部以外,大部分区域共 84 站均呈增加的变化趋势,其中郓城、龙口等 56 站增加趋势显著,通过了 0.05 的显著性水平检验;仅乳山、日照等 4 站有减少的变化趋势,只有乳山减少趋势显著,通过了 0.05 的显著性水平检验。极端高温日出现天数变化趋势在  $0.06 \sim 2.22 d \cdot (10 a)^{-1}$  之间,全省 88 站均呈增加的变化趋势,其中 66 站增加趋势显著,通过了 0.05 的显著性水平检验,鲁北、鲁中、鲁南大部、半岛地区增加趋势最明显,部分地区超过  $1.51 d \cdot (10 a)^{-1}$ 。

### 2.4.2 平均强度

由各极端热事件平均强度空间分布(图 7a、c、e)可见,鲁西北、鲁北等地是山东极端热昼平均强度较大的地区,部分区域超过  $1.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,鲁南、鲁中、半岛沿海地区相对较小。鲁西北、鲁中中东部、半岛大部区域的极端热夜强度相对较大,超过  $0.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,鲁南、鲁西南、鲁东南大部区域强度相对较小。鲁西北部分区域、鲁中北部和东部、半岛北部等区域的极端高温日平均强度相对较大,超过  $3.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,其他区域强度一般在  $2.5 \sim 3.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  之间。

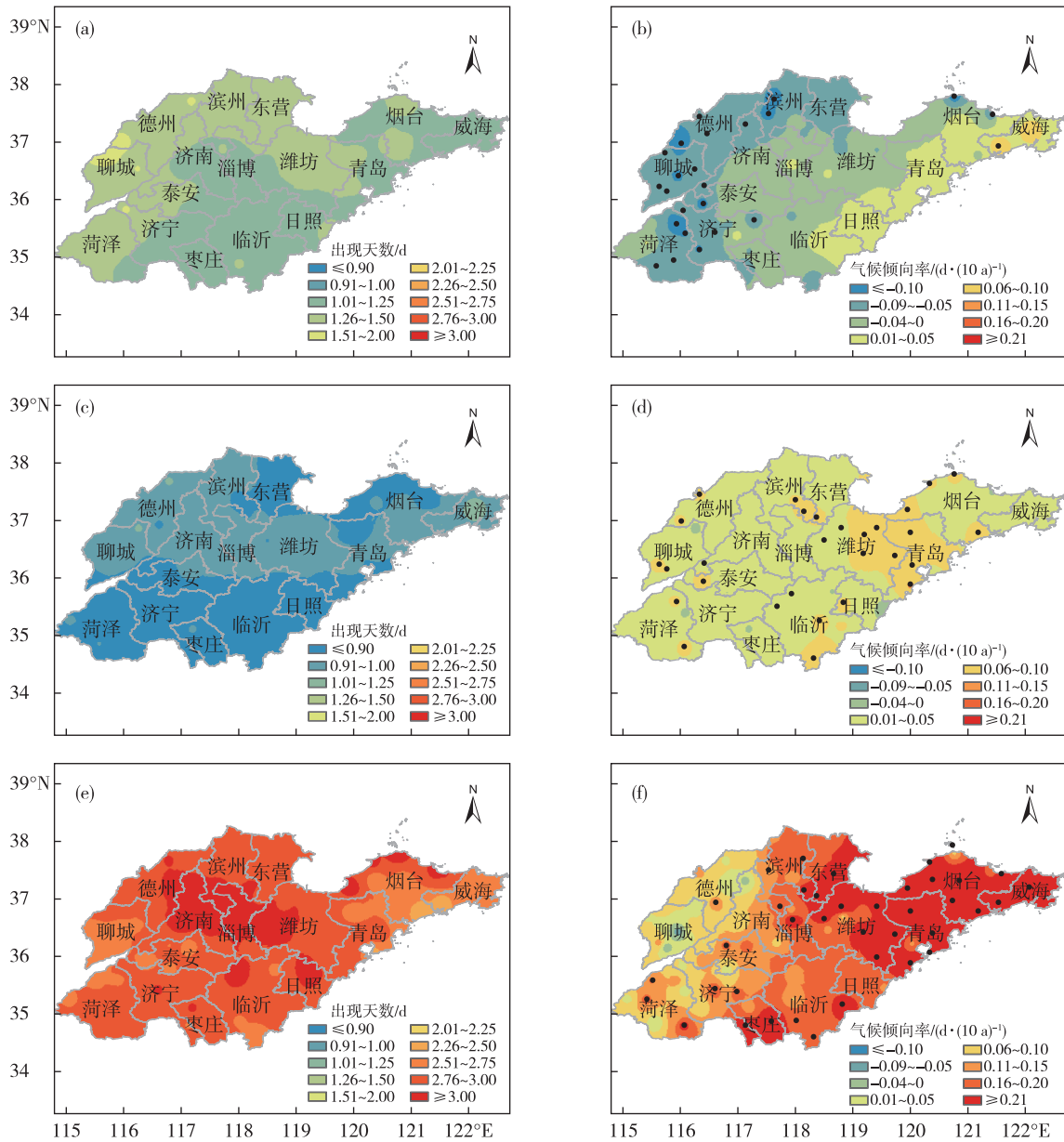


图 7 1961—2019 年山东各站极端热昼(a,b)、极端热夜(c,d)、极端高温日(e,f)平均强度空间分布(a,c,e,单位: $^{\circ}\text{C}$ )和变化趋势(b,d,f,单位: $^{\circ}\text{C} \cdot (10 a)^{-1}$ )

Fig.7 Spatial distribution (a, c, e, units:  $^{\circ}\text{C}$ ) and variation tendency (b, d, f, units:  $^{\circ}\text{C} \cdot (10 a)^{-1}$ ) of mean intensity of extreme hot daytime (a, b), extreme hot nighttime (c, d), and extreme hot days (e, f) at different stations in Shandong from 1961 to 2019



由各极端热事件平均强度空间变化趋势(图7b、d、f)可见,山东各站极端热昼平均强度变化趋势在 $-0.15 \sim 0.08 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 之间,呈减小变化趋势的站点主要出现在山东中西部区域,共68站,其中夏津、蓬莱、郯城等23站减小趋势显著,通过了0.05的显著性水平检验,减小趋势显著的站点主要分布在鲁西北、鲁西南及半岛北部局部地区;呈增强变化趋势的站点主要出现在半岛东部和南部区域,共20站,其中仅乳山站增强趋势显著,通过了0.05的显著性水平检验,增强趋势为 $0.08 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。极端热夜平均强度变化趋势在 $-0.04 \sim 0.50 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 之间,全省大部分区域共81站均呈增强的变化趋势,其中黄岛、郯城等29站增强趋势显著,通过了0.05的显著性水平检验;其他7站有减小的变化趋势,但减小趋势均不显著,未通过0.05的显著性水平检验。极端高温日平均强度变化趋势在 $-0.07 \sim 0.53 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 之间,全省共85站均呈增强的变化趋势,其中39站增强趋势显著,通过了0.05的显著性水平检验,鲁南南部、半岛地区增强趋势最明显,部分地区超过 $0.21 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ;其他各站减小趋势均不显著,未通过0.05的显著性水平检验。

### 2.4.3 占比

由各极端热事件占比空间分布(图8a、c、e)可见,山东中西部、半岛中部等部分区域极端热昼占比较大,超过35.0%,鲁东南、半岛北部等区域相对较小,占比在30.0%~35.0%之间。鲁西北、鲁中南部和东部、半岛中部和东部等区域的极端热夜占比相对较大,超过40.0%,其他区域占比在30.0%~40.0%之间。鲁中北部、鲁南、鲁东南、半岛北部区

域的极端高温日占比相对较大,超过25.0%,其他区域占比一般在20.0%~25.0%之间。

由各极端热事件占比空间变化趋势(图8b、d、f)可见,山东各站极端热昼占比变化趋势在 $-6.25\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 至 $2.86\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 之间,全省大部分站点共85站均呈减少的变化趋势,其中无棣、惠民、章丘等57站减少趋势显著,通过了0.05的显著性水平检验;呈增加变化趋势的站点出现在半岛南部沿海区域,共3站,其中乳山和日照增加趋势显著,通过了0.05的显著性水平检验,增加趋势分别为 $2.76\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $2.86\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。极端热夜占比变化趋势在 $-6.26\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 至 $3.87\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 之间,山东中西部大部分区域共68站占比呈增加变化趋势,其中郯城、章丘等12站增加趋势显著,通过了0.05的显著性水平检验;仅乳山、日照等5站减少变化趋势显著,通过了0.05的显著性水平检验,均出现在半岛沿海区域。极端高温日占比变化趋势在 $0 \sim 4.23\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 之间,全省所有站点均呈增加的变化趋势,其中49站增加趋势显著,通过了0.05的显著性水平检验,鲁西北、鲁中、半岛地区增加趋势最明显,部分地区超过 $3.00\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

### 2.5 突变特征

利用 Mann-Kendall 突变检验方法、累积距平、滑动 T 检验、Yamamoto 检验等方法对山东极端热昼(图9)、极端热夜(图10)、极端高温日(图11)的全省各站历年平均出现天数和平均强度序列进行综合突变检验。各极端高温参数指标的突变特征和突变前后各指标变化特征详见表2和表3。

表2 1961—2019年山东各站平均极端热事件出现天数、平均强度的M-K检验、累积距平、滑动T检验和Yamamoto检验确定的突变年

Table 2 Mutation years of mean frequency and intensity of extreme hot events at different stations in Shandong from 1961 to 2019 derived by Mann-Kendall mutation test, cumulative anomaly, Moving-t test, and Yamamoto test

指标	参数	突变年			
		累积距平	M-K 检验	滑动 T 检验	Yamamoto 检验
出现天数(d)	极端热昼	1969	—	—	—
	极端热夜	1994	2004	1994	1994
	极端高温日	1994	2012	1994	1994
平均强度(°C)	极端热昼	1970	1970	1970	1970
	极端热夜	1994	—	1994	1994
	极端高温日	1996	—	1973	1973

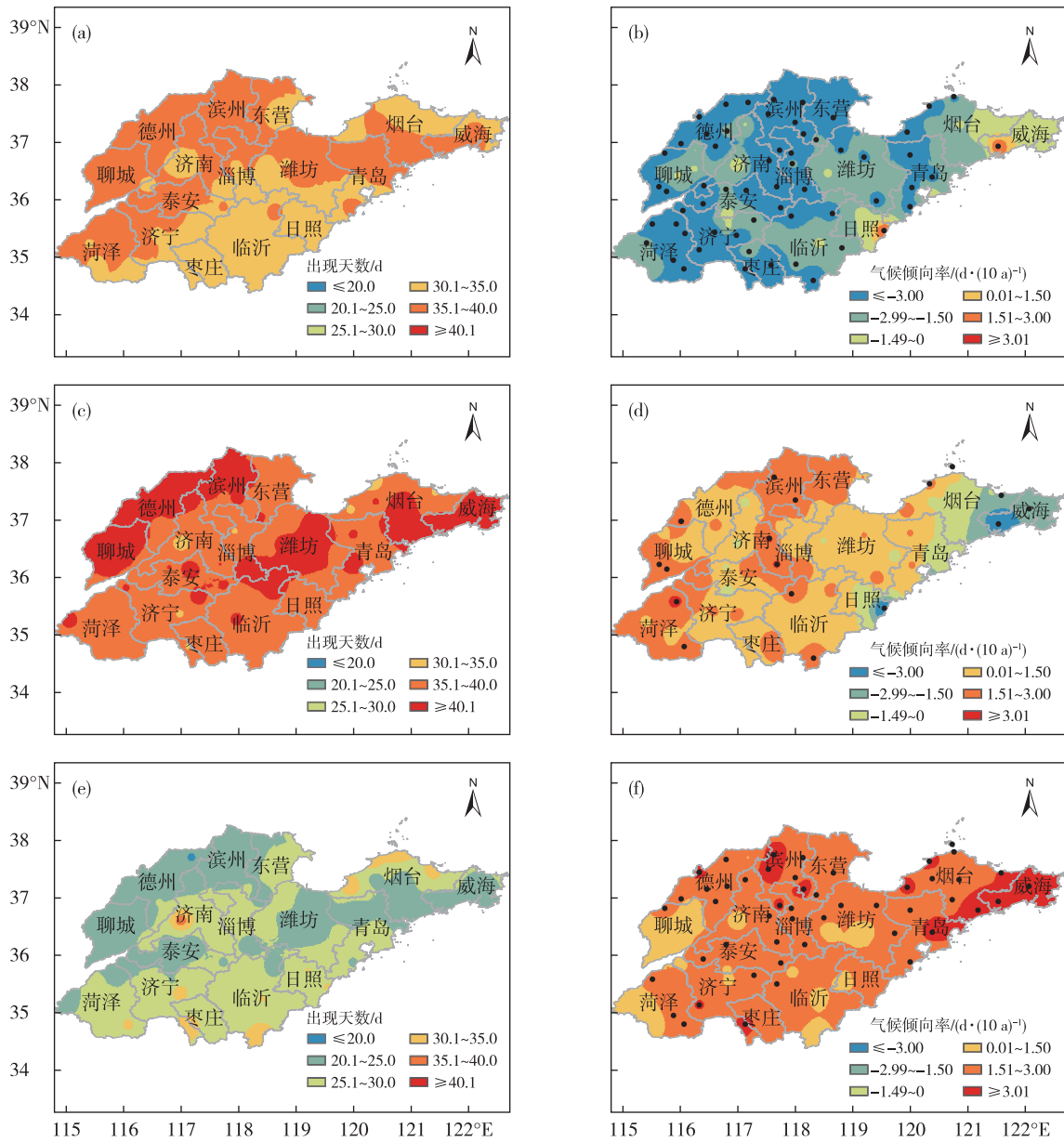


图8 1961—2019年山东各站极端热昼(a,b)、极端热夜(c,d)、极端高温日(e,f)出现天数占比空间分布(a,c,e,单位:%)和变化趋势(b,d,f,单位:%·(10 a)<sup>-1</sup>)

Fig.8 Spatial distribution (a, c, e, units: %) and variation tendency (b, d, f, units: %·(10 a)<sup>-1</sup>) of proportion of extreme hot daytime (a, b), extreme hot nighttime (c, d), and extreme hot days (e, f) at different stations in Shandong from 1961 to 2019

历年极端热昼出现天数累积距平在1968年达到最大,1969年之后呈波动减少变化趋势;M-K检验的UF和UB线在显著性水平临近线内存在多个交点,不能判断各交点是否为突变点;滑动T检验和Yamamoto检验分别取5~15 a子序列进行突变分析,各子序列均没有超过显著性检验水平的突变点,综合判断历年极端热昼出现天数没有发生突变。历年极端热昼平均强度累积距平在1969年达到最大,1970年之后呈波动下降变化趋势;M-K检

验的UF和UB线在显著性水平临近线内仅有一个交点,相交于1970年前后,初步判断为突变点;滑动T检验和Yamamoto检验突变均发生在1970年前后,综合判断历年极端热昼平均强度在1970年前后发生突变。由表3突变前后对比结果看,突变发生后,平均强度由突变前的1.6℃,减小为1.2℃,减小了0.4℃。1970年以前,平均强度呈较明显的增强趋势,1970年之后,历年平均强度呈波动变化,但气候倾向率较小。

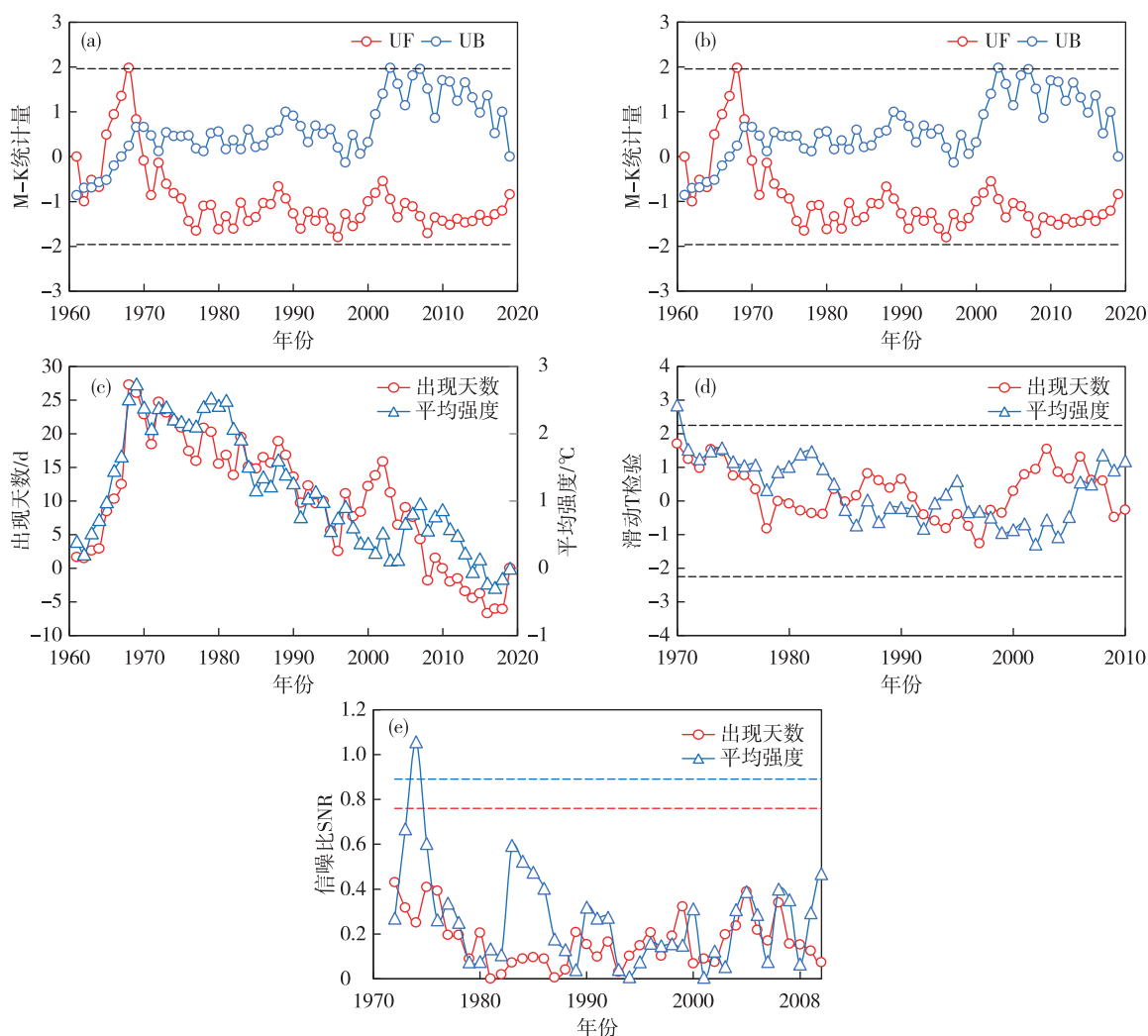


图9 1961—2019年山东各站平均极端热昼出现天数(a,单位:d)和平均强度(b,单位:°C)的M-K检验(a、b)、累积距平(c)、滑动T检验(d)、Yamamoto检验(e)突变检验图(Mann-Kendall突变检验方法中UF线是各极端热事件指标的序统计曲线,UB是逆序统计曲线,点虚线是0.05显著性水平检验的临界线。滑动T检验和Yamamoto检验分别进行5~15a子序列的滑动突变检验,取超过显著性水平较明显的子序列突变检验结果进行绘图,滑动T检验子图为9a滑动结果图,点虚线是0.05显著性水平检验临界线。Yamamoto检验子图的出现天数为9a滑动结果图,红色点虚线是0.05显著性水平检验临界线;Yamamoto检验子图的平均强度为7a滑动结果图,蓝色点虚线是0.05显著性水平检验临界线)

Fig.9 Mann-Kendall mutation test (a, b), cumulative anomaly (c), Moving-t test (d), and Yamamoto test (e) of mean frequency (a, units: d) and intensity (b, units: °C) of extreme hot daytime at different stations in Shandong from 1961 to 2019 (in Mann-Kendall mutation test, UF line is order statistic curve of each index of extreme hot events, UB line is reversed order statistic curve, and dotted line is critical line of significance test at 0.05 level. Moving-t test and Yamamoto test conduct mutation test by 5-15 a subsequence, respectively, test results significantly above the significance test are used to draw, subgraph of Moving-t test is 9 a moving result, and dotted line is critical line of significance test at 0.05 level. Frequency in subgraph of Yamamoto test is 9 a moving result and red dotted line is critical line of significance test at 0.05 level; mean intensity in subgraph of Yamamoto test is 7 a moving result and blue dotted line is critical line of significance test at 0.05 level)

历年极端热夜出现天数和平均强度累积距平均在1993年达到最小,1994年后开始明显增加;出现天数M-K检验的UF和UB线在显著性水平临界线内的唯一交点在2004年前后,平均强度M-K检验在临界线内有多个交点;滑动T检验和Yamamoto

检验结果表明极端热夜出现天数和平均强度均在1994年前后发生突变,因此,综合判断历年极端热夜出现天数和平均强度在1994年发生突变,突变后出现天数增加、平均强度增强。由表3突变前后对比结果看,突变发生后,极端热夜出现天数明显增

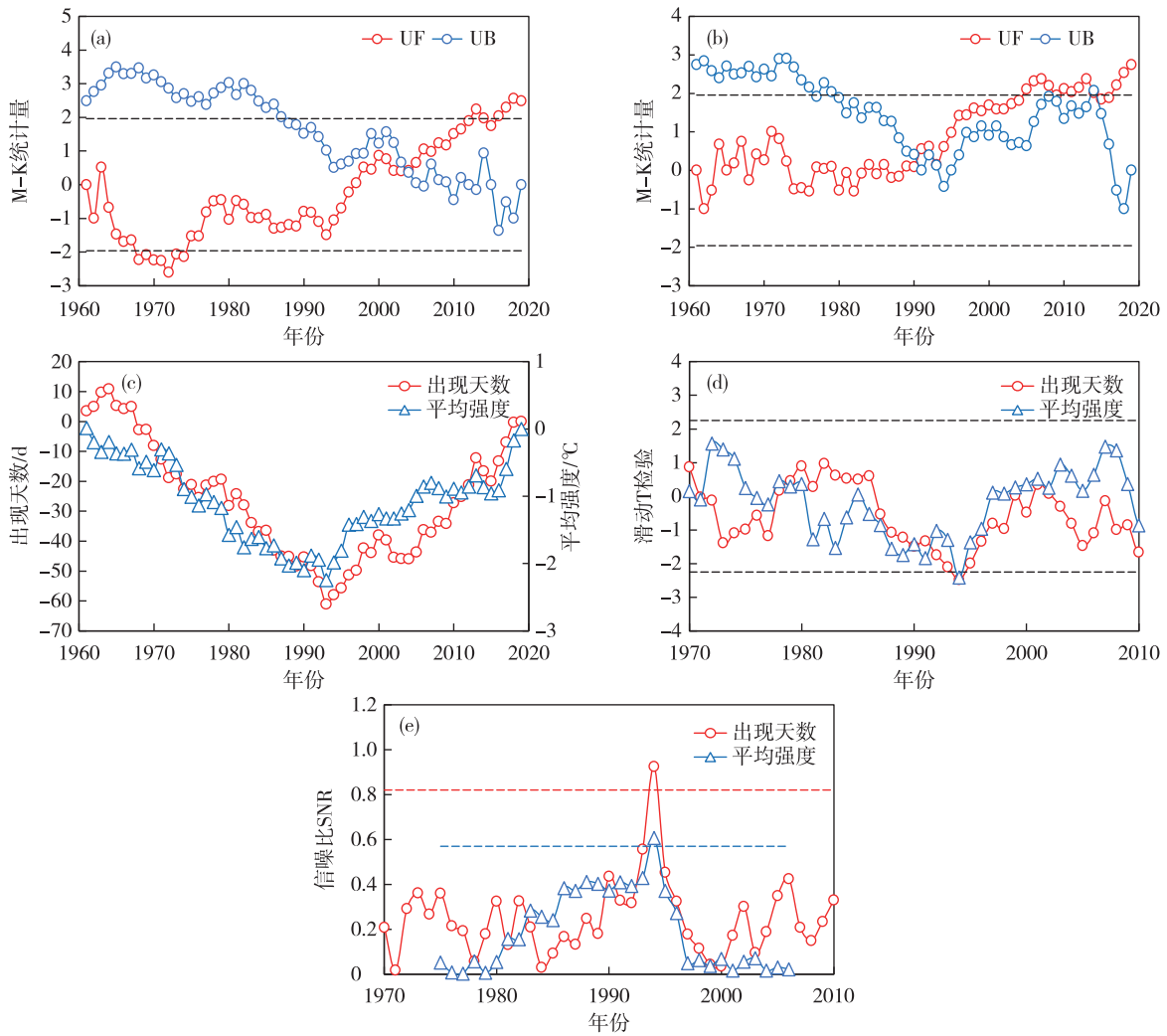


图 10 1961—2019 年山东各站平均极端热夜出现天数(a,单位:d)和平均强度(b,单位:°C)的 M-K 检验(a,b)、累积距平(c)、滑动 T 检验(d)、Yamamoto 检验(e)突变检验图(各子图说明详见图 9,但 Yamamoto 检验子图的出现天数为 8 a 滑动结果图,红色点虚线是 0.05 显著性水平检验临界线,平均强度为 14 a 滑动结果图,蓝色点虚线是 0.05 显著性水平检验临界线)

Fig.10 Mann-Kendall mutation test (a, b), cumulative anomaly (c), Moving-t test (d), and Yamamoto test (e) of mean frequency (a, units: d) and intensity (b, units: °C) of extreme hot nighttime at different stations in Shandong from 1961 to 2019 (see Fig.9 for description of each subgraph, but frequency in subgraph of Yamamoto test is 8 a moving result, red dotted line is critical line of significance test at 0.05 level, mean intensity in subgraph of Yamamoto test is 14 a moving result, and blue dotted line is critical line of significance test at 0.05 level)

加,平均增加了 4.2 d,且气候倾向率由减少( $-1.04 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ )转为明显增加( $0.55 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ )。突变发生后,极端热夜平均强度增加了  $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,但气候倾向率变化不大,1961—2019 年极端热夜平均强度呈显著增强变化趋势的原因之一是突变后平均强度明显增强。

历年极端高温日出现天数累积距平在 1993 年达到最小,1994 年之后逐年增加;M-K 检验结果的唯一交点出现在 2012 年前后;滑动 T 检验和 Yamamoto 检验结果均在 1994 年发生突变,因此,综

合判断历年极端高温日出现天数在 1994 年前后发生突变,突变后明显增加。历年极端高温日平均强度则在 1995 年达到最小,1996 年之后逐年增强,M-K 检验结果在显著性水平临界线内存在多个交点,不能判断各交点是否为突变点;滑动 T 检验和 Yamamoto 检验结果均在 1973 年发生突变,因此,判断历年极端高温日平均强度在 1973 年前后发生突变,突变后平均强度增强。由表 3 突变前后对比结果看,突变发生后,极端高温日出现天数增加了 5.1 d,由 5.6 d 增加为 10.7 d,气候倾向率由显著减

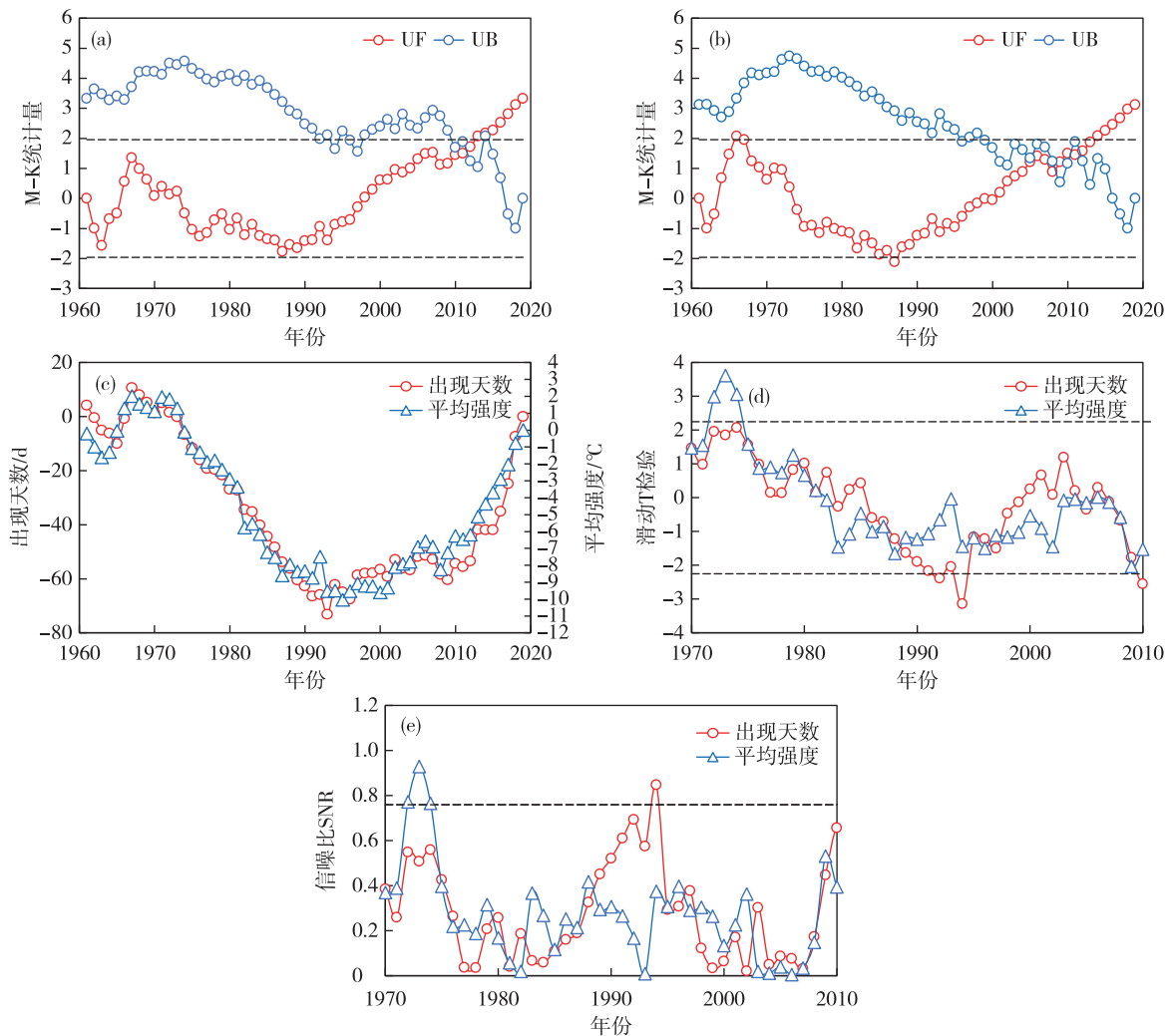


图 11 1961—2019 年山东极端高温日出现天数(a, 单位: d)和平均强度(b, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )的 M-K 检验(a, b)、累积距平(c)、滑动 T 检验(d)、Yamamoto 检验(e)突变检验图(各子图说明详见图 9, 但 Yamamoto 检验子图的出现天数和平均强度均为 9 a 滑动结果图, 点虚线是出现天数和平均强度的 0.05 显著性水平检验临界线)

Fig.11 Mann-Kendall mutation test (a, b), cumulative anomaly (c), Moving-t test (d), and Yamamoto test (e) of frequency (a, units: d) and mean intensity (b, units:  $^{\circ}\text{C}$ ) of extreme hot days at different stations in Shandong from 1961 to 2019 (see Fig. 9 for description of each subgraph, but frequency and mean intensity in subgraph of Yamamoto test are 9 a moving results, and dotted line is critical line of significance test at 0.05 level for frequency and mean intensity)

少( $-1.56 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ) 转为显著增加( $2.55 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ), 变化趋势均通过了 0.05 显著性水平检验。突变发生后, 虽然极端高温日平均强度减小  $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 但其气候倾向率上升趋势通过了 0.05 显著性水平检验。

由各极端高温参数出现天数和平均强度突变分析结果看, 山东的极端热夜和极端高温日虽然发生突变的时间不一致, 但突变后多呈增加的变化趋势, 表明山东的极端热夜和极端高温日出现天数更多、强度更强。

### 3 讨论

研究表明山东夜间出现极端热事件及白天和夜间同时出现极端热事件的天数增多、强度增强、占比增加。如果仅考虑将极端气温划分为传统的 ETCCDI 定义的暖昼(日最高气温超过阈值而不考虑最低气温是否超过阈值)和暖夜(日最低气温超过阈值而不考虑最高气温是否超过阈值)两大类, 其分析结果与本研究存在较大的不一致性, 暖昼出现天数呈不显著增加变化趋势(图 12a), 其气候倾向率为  $0.85 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 未通过 0.05 的显著性水平检验, 强度呈微弱的减小变化趋势(图 12b), 其气



表3 1961—2019年山东各站平均极端热事件出现天数、平均强度突变前和突变后变化对比分析

Table 3 Comparative analysis before and after mutation of mean frequency and intensity of extreme hot events at different stations in Shandong from 1961 to 2019

指标	参数	突变年	突变前		突变后		突变前后平均值的差值
			平均值	气候倾向率/(10 a) <sup>-1</sup>	平均值	气候倾向率/(10 a) <sup>-1</sup>	
出现天数(d)	极端热昼	—	—	—	—	—	—
	极端热夜	1994	8.8	-1.04	13.0	0.55	4.2
	极端高温日	1994	5.6	-1.56*	10.7	2.52*	5.1
平均强度(℃)	极端热昼	1970	1.6	0.41	1.2	0.01	-0.4
	极端热夜	1994	0.8	-0.01	1.0	-0.01	0.2
	极端高温日	1973	3.0	0.35	2.8	0.37*	-0.2

注：\*表示通过了0.05显著性水平检验。

候倾向率为  $0.002\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ，与本文采用的极端热昼指标变化明显不同，出现天数、强度变化趋势相反，这主要是由于传统的暖昼指数包含了本文定义的极端热昼和极端高温日两部分，虽然热昼指数出现天数呈减少趋势，但由于极端高温日出现天数增加趋势更显著，造成传统的暖昼指数呈不显著的增加趋势，同理，暖昼平均强度减小趋势也较极端热昼明显减弱。暖夜出现天数(图12c)呈增加、强度(图12d)呈增强的变化趋势，其气候倾向率分别为  $2.12\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 、 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ，增加、增强变化趋势显著，通过了0.05的显著性水平检验，出现天数、强度的增加、增强变化趋势较本文采

用的极端热夜指标变化更明显。从暖昼和暖夜出现天数和平均强度突变分析结果(表4、表5)看，仅暖夜突变年和本文分析的极端热夜突变年一致，表明本文分析的极端气温参数与传统的极端气温参数存在较明显的时间变化差异。暖夜出现天数发生突变后，平均值增加9.2 d，远高于极端热夜出现天数突变后增加的4.2 d。暖昼平均强度发生突变后，平均值减小0.2℃，较极端热昼平均强度少减小0.2℃。暖夜平均强度发生突变后，平均强度增强0.3℃，高于极端热夜平均强度突变后的增强值。同时，传统的暖昼和暖夜出现天数、平均强度突变后气候倾向率明显大于极端热昼和极端热夜相应

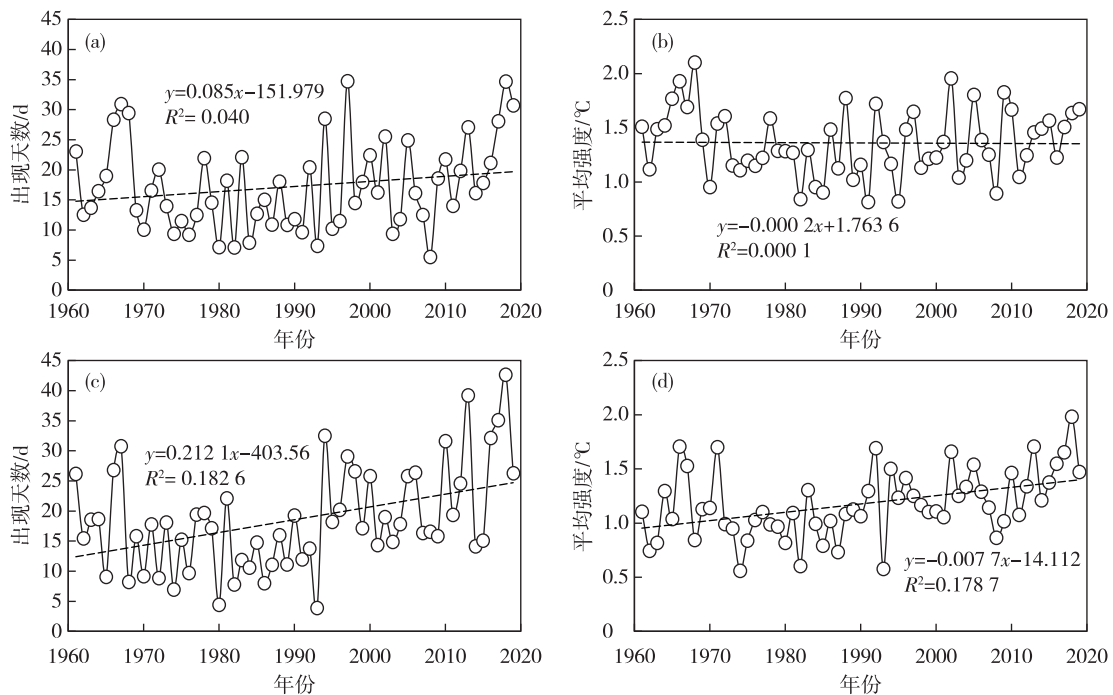


图12 1961—2019年山东各站平均暖昼(a、b)和暖夜(c、d)出现天数(a、c,单位:d)、平均强度(b、d,单位:℃)历年变化  
Fig.12 Annual variation of mean frequency (a, c; units: d) and intensity (b, d; units: °C) of warm daytime (a, b) and warm nighttime (c, d) at different stations in Shandong from 1961 to 2019

的气候倾向率值。传统的暖昼和指数均包含了变化趋势更显著的白天和黑夜同时达到极端热事件的指标,因此,将白天和夜间同时达到极端热事件

过程分离出来,可以更好地认识更为严重的极端热事件的实际发生情况。

表4 传统的暖昼和暖夜出现天数、平均强度的M-K检验、累积距平、滑动T检验和Yamamoto检验确定的突变年

Table 4 Mutation years of mean frequency and intensity of conventional warm days and warm nights in Shandong from 1961 to 2019 derived by Mann-Kendall mutation test, cumulative anomaly, Moving-t test, and Yamamoto test

指标	参数	突变年			
		累积距平	M-K 检验	滑动 T 检验	Yamamoto 检验
出现天数(d)	暖昼	1997	2016	1973	1969
	暖夜	1994	—	1994	1994
平均强度(°C)	暖昼	—	—	1974	1974
	暖夜	1991	—	1989	1991

表5 1961—2019年山东各站暖昼和暖夜出现天数、平均强度突变前和突变后变化对比分析

Table 5 Comparative analysis before and after mutation of frequency and mean intensity of conventional warm days and warm nights at different stations in Shandong from 1961 to 2019

指标	参数	突变年	突变前		突变后		突变前后平均值的差值
			平均值	气候倾向率/(10 a) <sup>-1</sup>	平均值	气候倾向率/(10 a) <sup>-1</sup>	
出现天数(d)	热昼	—	—	—	—	—	—
	热夜	1994	14.5	-2.60*	23.7	3.07	9.2
平均强度(°C)	热昼	1974	1.5	-0.10	1.3	0.07*	-0.2
	热夜	1991	1.0	-0.07	1.3	0.11	0.3

注: \*表示通过了0.05显著性水平检验。

山东不同区域极端气温指数时空变化呈现明显的差异性。内陆地区极端热昼各指标减小趋势更明显,而沿海地区极端高温日各指标增加趋势更明显,这与山东海陆位置差异、大气环流背景及人类活动等的影响密切相关。诸多研究<sup>[43-45]</sup>已经表明,日最高和最低气温变化是不对称的,即日最低气温上升幅度更大,而日最高气温变化幅度较小,本文的研究结果进一步验证了日最高、最低变化的不对称性。对济南地区来说,三个极端气温参数中,济南极端高温日出现天数更多,且有增多变化趋势,极端热夜和极端高温日强度更大,亦有增强变化趋势,极端高温日的占比也最高,且有增多变化趋势,这与城市热岛效应影响显著相关,白天热岛效应较夜间更小<sup>[46]</sup>,使得济南地区日最低气温上升更明显,因此基于日最低气温的极端热夜和极端高温日指数上升趋势显著。另一个原因可能是城市的气溶胶含量更高,削弱了太阳辐射强度,减小了白天的热岛效应,夜间气溶胶减少了城市地面上的长波辐射,进一步增强了夜间的热岛效应,使

得夜间的气温上升更明显。目前,人类活动造成的地表下垫面特征改变、温室气体排放等对区域升温的影响越来越明显,但其在极端热事件中的影响机制和影响程度需要进一步的分析和研究。

## 4 结论

1) 山东夜间出现极端热事件及白天和夜间同时出现极端热事件的天数增多、强度增强、占比增加。山东历年平均极端热昼、极端热夜、极端高温日出现天数、强度、占比变化趋势类似,均表现为极端热昼出现天数和占比减少、强度减小的变化趋势,但仅占比指标减少趋势通过了0.05的显著性水平检验;极端热夜、极端高温日出现天数和占比增加、强度增强变化趋势,其中极端热夜出现天数、强度及极端高温日出现天数、强度、占比变化趋势均通过了0.05的显著性水平检验。

2) 山东内陆和沿海地区各极端热事件指数变化差异明显。内陆地区极端热昼出现天数和占比减少、强度减小趋势更显著,半岛南部和东部部分

区域则有增加趋势;中西部地区极端热夜出现天数和占比增加、强度增强趋势更显著;中东部区域尤其是半岛地区极端高温日出现天数和占比增加、强度增强趋势更显著。

3) 山东区域的各极端热事件不同指标的突变情况迥异。极端热昼历年出现天数没有发生突变,平均强度在 1970 年前后发生突变,突变发生后,平均强度减小了  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;极端热夜出现天数和平均强度均在 1994 年前后发生突变,突变发生后,出现天数增加了  $4.2\text{ d}$ ,气候倾向率由减少  $(-1.04\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1})$  转为明显增加  $(0.55\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1})$ ,平均强度增强了  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但气候倾向率变化不大;极端高温日出现天数和强度分别在 1994 年、1973 年前后发生突变,突变发生后,出现天数增加了  $5.1\text{ d}$ ,由  $5.6\text{ d}$  增加为  $10.7\text{ d}$ ,气候倾向率由显著减少  $(-1.56\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1})$  转为显著增加  $(2.55\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1})$ ,变化趋势均通过了  $0.05$  显著性水平检验,平均强度的气候倾向率增强趋势通过了  $0.05$  显著性水平检验。

### 参考文献:

- [1] FOUILLET A, REY G, LAURENT F, et al. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France [J]. *Int Arch Occ Environ Health*, 2006, 80(1): 16-24.
- [2] TOBIAS A, DE OLALLA P G, LINARES C, et al. Short-term effects of extreme hot summer temperatures on total daily mortality in Barcelona, Spain [J]. *Int J Biometeorol*, 2010, 54(2): 115-117.
- [3] 郑山, 王敏珍, 尚可政, 等. 高温热浪对北京 3 所医院循环系统疾病日急诊人数影响的病例-交叉研究 [J]. *卫生研究*, 2016, 45(2): 246-251.
- [4] 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(增刊): 1-10.
- [5] RUSTICUCCI M. Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America [J]. *Atmos Res*, 2012, 106: 1-17.
- [6] SILLMANN J, KHARIN VV, ZHANG X, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate [J]. *J Geophys Res*, 2013, 118(4): 1716-1733.
- [7] MIN S K, ZHANG X B, ZWIERS F W, et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes [J]. *Nature*, 2011, 470(7334): 378-381.
- [8] SILLMANN J, KHARIN VV, ZWIERS F W, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections [J]. *J Geophys Res*, 2013, 118(6): 2473-2493.
- [9] WEN H Q, ZHANG X B, XU Y, et al. Detecting human influence on extreme temperatures in China [J]. *Geophys Res Lett*, 2013, 40(6): 1171-1176.
- [10] DONAT M G, ALEXANDER L V, YANG H, et al. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset [J]. *J Geophys Res*, 2013, 118(5): 2098-2118.
- [11] KRUGER A C, SEKELE S S. Trends in extreme temperature indices in South Africa: 1962—2009 [J]. *Int J Climatol*, 2013, 33(3): 661-676.
- [12] ZHOU B T, XU Y, WU J, et al. Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: Analysis of a high-resolution grid dataset [J]. *Int J Climatol*, 2016, 36(3): 1051-1066.
- [13] WU J, HAN Z Y, XU Y, et al. Changes in extreme climate events in China under  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  global warming targets: Projections using an ensemble of regional climate model simulations [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2020, 125(2): e2019JD031057.
- [14] CHEN Y Q D, LI J F, ZHANG Q. Changes in site-scale temperature extremes over China during 2071—2100 in CMIP5 simulations [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121(6): 2732-2749.
- [15] 姚遥, 罗勇, 黄建斌. 8 个 CMIP5 模式对中国极端气温的模拟和预估 [J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(4): 250-256.
- [16] 周雅清, 任国玉. 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*, 2010, 15(4): 405-417.
- [17] 孔钦钦, 葛全胜, 郑景云. 中国极端通用热气候指数的时空变化 [J]. *地理研究*, 2017, 36(6): 1171-1182.
- [18] 王晓利, 侯西勇. 1961—2014 年中国沿海极端气温事件变化及区域差异分析 [J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7098-7113.
- [19] 黄小燕, 王小平, 王劲松, 等. 1960~2013 年中国沿海极端气温事件变化特征 [J]. *地理科学*, 2016, 36(4): 612-620.
- [20] 谢志祥, 李亚男, 秦耀辰, 等. 1960—2012 年淮河流域极端气温变化特征 [J]. *中国农业气象*, 2017, 38(7): 407-416.
- [21] 王怀军, 潘莹萍, 陈忠升. 1960~2014 年淮河流域极端气温和降水时空变化特征 [J]. *地理科学*, 2017, 37(12): 1900-1908.
- [22] 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962—2011 年长江流域极端气温事件分析 [J]. *地理学报*, 2013, 68(5): 611-625.
- [23] 吴灿, 赵景波, 王格慧. 黄河流域极端气温指数的气候演变特征分析 [J]. *中国农业气象*, 2015, 36(5):

- 525-535.
- [24] 袁文德,郑江坤.1962~2012年西南地区极端温度事件时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2015,24(7):1246-1254.
- [25] 刘琳,徐宗学.西南5省市极端气候指数时空分布规律研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(2):294-301.
- [26] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.1965—2013年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异[J].地理研究,2016,35(4):639-652.
- [27] 周雅清,任国玉.城市化对华北地区极端气温事件频率的影响[J].高原气象,2014,33(6):1589-1598.
- [28] 王冀,蒋大凯,张英娟.华北地区极端气候事件的时空变化规律分析[J].中国农业气象,2012,33(2):166-173.
- [29] GARCÍA-HERRERA R, DÍAZ J, TRIGO R M, et al. A review of the European summer heat wave of 2003 [J]. *Crit Rev Environ Sci Technol*, 2010, 40(4): 267-306.
- [30] GOSLING S N, LOWE J A, MCGREGOR G R, et al. Associations between elevated atmospheric temperature and human mortality: A critical review of the literature [J]. *Climatic Change*, 2009, 92(3/4): 299-341.
- [31] GRUMM R H. The central European and Russian heat event of July-August 2010 [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2011, 92(10): 1285-1296.
- [32] 于凤硕,廉丽姝,初翠翠.山东省极端气温事件的时空变化特征[J].气象科技,2017,45(5):843-850.
- [33] 曹洁,叶文,刘焕彬,等.山东省极端气温偏态性分布和变化特征[J].气象科学,2014,34(2):193-199.
- [34] 徐宗学,孟翠玲,赵芳芳.山东省40a来的气温和降水变化趋势分析[J].气象科学,2007,27(4):387-393.
- [35] 陈德英,王兴堂.山东省1961~2008年极端气温和降水事件变化[J].安徽农业科学,2010,38(18):9641-9645.
- [36] 宋连春,肖风劲,叶殿秀.气象灾害影响及风险评估理论与实践[M].北京:气象出版社,2012:64-74.
- [37] 张曦,黎鑫.湖南省夏季高温热浪时空分布特征及其成因[J].气候与环境研究,2017,22(6):747-756.
- [38] 李双双,杨赛霓,张东海,等.近54年京津冀地区热浪时空变化特征及影响因素[J].应用气象学报,2015,26(5):545-554.
- [39] 董旭光,刘焕彬,汤子东,等.气候变化背景下山东大气自净能力特征分析[J].海洋气象学报,2018,38(4):93-102.
- [40] 董旭光,邱燊,李娟,等.1981—2016年山东陆地观测最大风速变化特征[J].海洋气象学报,2018,38(2):87-95.
- [41] 王岱,游庆龙,江志红,等.基于均一化资料的中国极端地面气温变化分析[J].高原气象,2016,35(5):1352-1363.
- [42] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007:61-63.
- [43] 谢庄,曹鸿兴.北京最高和最低气温的非对称变化[J].气象学报,1996,54(4):501-507.
- [44] 王君,严中伟,李珍,等.近30年城市化对北京极端温度的影响[J].科学通报,2013,58(33):3464-3470.
- [45] 张雷,任国玉,刘江,等.城市化对北京气象站极端气温指数趋势变化的影响[J].地球物理学报,2011,54(5):1150-1159.
- [46] 季崇萍,刘伟东,轩春怡.北京城市化进程对城市热岛的影响研究[J].地球物理学报,2006,49(1):69-77.