

李娟, 闫会平, 朱志伟, 2020. 中国夏季极端气温与降水事件日数随平均气温变化的定量分析[J]. 高原气象, 39(3): 532-542. LI Juan, YAN Huiping, ZHU Zhiwei, 2020. Quantitative Analysis of Changes of Summer Extremes Temperature and Precipitation Days over China with Respect to the Mean Temperature Increase[J]. Plateau Meteorology, 39(3): 532-542. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00042.

# 中国夏季极端气温与降水事件日数 随平均气温变化的定量分析

李娟<sup>1</sup>, 闫会平<sup>1</sup>, 朱志伟<sup>1,2</sup>

(1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/  
气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 大气科学学院, 江苏 南京 210044;  
2. 淮河流域气象中心, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 极端高温、极端低温、极端降水事件日数对全球平均气温变化都有较强响应。本文利用全国1960—2005年549个站点逐日均一化温度资料以及559个站点逐日降水数据, 定量分析了中国夏季极端气温与降水事件日数随气温变化的特征。结果表明: 全球平均气温升高1℃, 全国平均的极端高温、低温和降水日数的变化量分别为5.69, -5.3和0.69天; 区域尺度上, 全球平均气温升高1℃, 东南沿岸和四川地区极端高温日数可增加8~10天, 东北地区极端低温日数减少10天左右, 西北地区极端降水日数可增加4~6天。基于以上结果, 利用模式对未来全球平均气温的预估表明: 2006—2099年我国平均的极端高温、低温、降水日数变化量在RCP8.5情景下最大, 分别增加23天、减少22天和增加3天; 区域尺度上, RCP8.5情景下2006—2099年我国东南以及西南地区极端高温日数可增加42天左右, 我国北方大部分地区极端低温日数减少33天左右, 而西北地区极端降水日数可增加16天左右。该研究结果表明一系列应对气候变化的措施势在必行。

**关键词:** 极端高温日数; 极端低温日数; 极端降水日数; 平均气温; 定量分析

**文章编号:** 1000-0534(2020)03-0532-11 **中图分类号:** P467 **文献标识码:** A

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00042

## 1 引言

近年来, 有关全球极端气温/降水事件变化的研究越来越多。大多研究表明, 在全球变暖背景下, 高温事件的频次增加而低温事件的频次相应减少, 强降水事件增加, 但其仍具有区域性特征。全球70%的陆面冷夜减少的同时伴随暖夜增加, 冷日和暖日也有类似的变化, 但幅度较小。全球降水呈增加趋势, 但不如温度具有空间一致性(Alexander et al, 2006)。海洋上, Horton et al (2001) 通过分析逐年和逐季节的格点再分析资料, 指出海表温度从19世纪末起极端暖事件增加而冷事件减少。

区域性的极端事件变率也有较多研究。欧洲地区在1946—1999年区域平均的冷暖极端气温日数呈对称变化趋势, 而1946—1975年极端暖事件减少时极端冷事件并未增加, 1976—1999年极端冷暖事件也表现出明显非对称变化(Tank et al, 2002)。加拿大南部从1900—1998年冬季、春季及夏季极端低温日数显著减少, 冬季和春季极端高温日数增加, 夏季极端高温日数并没有明显的变化(Bonsal et al, 2010)。在印度, 暖日和暖夜的频率显示出显著的上升趋势, 而冷日和冷夜则呈显著的下降趋势(Kothawale et al, 2010)。印度中部1951—2000

收稿日期: 2019-01-23; 定稿日期: 2019-04-28

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0603804); 国家自然科学基金项目(41805048, 41605035); 淮河流域气象开放研究基金项目(HRM201801)

作者简介: 李娟(1985—), 女, 甘肃兰州人, 教授, 主要从事极端天气气候事件诊断及可预报性研究. E-mail: juanl@nuist.edu.cn

通信作者: 朱志伟(1986—), 男, 湖北十堰人, 教授, 主要从事气候动力学和气候变率研究. E-mail: zwz@nuist.edu.cn

年极端降水的频次和强度都显著增加,中雨频次显著减少。由于极端降水量的增加和中雨量的减少幅度相当,降水量并无明显变化趋势(Groisman et al, 1999)。南美洲1960—2000年极端降水的变化趋势和平均降水量的变化趋势基本一致(Haylock et al, 2006)。

对于中国极端天气、气候事件而言,有研究指出:中国北方夜间气温极端偏低的日数显著趋于变少,白天气温偏高的日数趋于增多,只有华北南部例外;而华北地区强降水事件趋于减少,但西北地区强降水事件趋于增多(翟盘茂等, 2003)。1970—2017年黄河上游极端降水事件的发生频率有所降低(马佳宁等, 2019)。近50年来中国北方干旱和半干旱地区极端低温事件发生的频率显著减少,而20世纪90年代之前,绝大多数地区极端高温事件的频率没有显著变化趋势,但近10年来却有明显的增加趋势(马柱国等, 2003)。进一步研究表明,1961—2014年来,全国极端高温指数在各区呈增加趋势,而极端低温指数在各区呈减小趋势,其中夜间极端气温指数变化程度最大(王岱等, 2016)。李培都等(2018)对敦煌及周边地区的极端降水频次的分析表明,除小部分地区呈现减小趋势外,敦煌、瓜州、酒泉、玉门和祁连均呈现增长趋势。

总结前入气候变化下极端天气事件频次变化的研究,发现他们大多关注趋势变化,或定性判断极端天气事件日数的频次变化,而有关区域性极端天气事件日数变化的定量分析较少。区域性极端天气事件能在多大程度上响应气候(气温)变化?这一定量性问题是本文要解决的主要问题。目前,国际主流气候模式只能预测大尺度范围的区域平均气候(温度与降水)变化,而对中小尺度区域气候的变化特别是极端天气频次的变化的模拟能力有限。因此,通过研究历史气候(气温)变化下极端天气事件日数变化的统计特征来间接预估未来区域极端天气频次具有较强的现实意义。本文首先诊断历史极端温度和降水事件日数随温度增加的变化统计特征,然后结合模式预估的全球平均气温变化结果对未来极端温度和降水事件日数的变化作出定量化预估。

## 2 资料来源和方法介绍

### 2.1 资料来源

中国的气温观测资料采用全国1960—2005年549个站点的逐日均一化温度资料集(Li et al, 2009),包括日最高气温,日最低气温以及日平均

气温。降水的观测资料是由中国气象局信息中心提供的1960—2005年逐日降水记录。该降水数据集包括全国821个站点,剔除任一年各季节降水缺省值超过10天的站点,最后筛选了559个站点来分析降水的变化。对于某季节缺测值小于10天的站点,采用缺测值所在天的前后5天,前后5年的所有非缺测日降水量的平均值代替。为了与模式预估的时段2006—2099年不重叠,因此文中所用的观测资料时段均为1960—2005年。各季节按照常用的季节划分为:春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12月至次年2月)。

全球表面平均温度距平的历史观测数据Had-CRUT3v(Hadley中心及英国气候研究中心温度数据第三版本)(Brohan et al, 2006)由英国气候研究中心和Hadley中心提供,其表面温度包括陆面温度和海表温度,本文观测研究时段选取1960—2005年。

模式资料使用了CMIP5(全球模式比较计划第五阶段)(Taylor et al, 2012)中所提供的五个全球海气耦合模式模拟(模式简介见表1)的全球逐月表面气温,包括1906—2005年的历史模拟结果以及2006—2099年的三种情景下,即代表浓度路径2.6, 4.5和8.5(RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)的预估结果。文中涉及的地图是基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1552的中国地图制作,底图无修改。

表1 所用5个全球耦合模式简要介绍

Table 1 Brief description of the five global coupled general circulation model (CGCM)

模式	模式机构	大气分辨率
BCC_CSM1.1	中国国家气候中心BCC/CMA, China	T42L26
BNU_ESM	北京师范大学BNU/GUESS, China	T42L18
CanESM2	加拿大CCCma, Canada	T63L35
CNRM-CM5	法国CNRM/CERFACS, France	TL127L31
NorESM1-M	挪威NCC, Norway	F19L26

### 2.2 极端天气事件的定义

类似于之前研究(Yan et al, 2002; Jones et al, 1999),本文定义了以百分位为基础的极端事件的指数,具体如下:

极端高(低)温事件:将某站从1960—2005年中同日及相邻5天(共11天)的最高(低)温度资料按升序排列,得到95(5)百分位值,作为这一天极端高(低)温的阈值。如果某日的最高气温高(低)于该日的极端温度事件的阈值,则认为出现了极端高

(低)温事件。

极端降水事件: 将1960—2005年某个测站同日及相邻40天(共81天)所有年的日降水量按升序排列, 90百分位值作为这一天极端降水事件的阈值, 当某站某日降水量超过此阈值时, 就认为发生了极端降水事件。因为降水的观测值较少, 为得到更多的样本来分析其年际及更长时间尺度的变化, 降水采用90百分位。

### 2.3 方法介绍

采用Liu et al(2009)的方法, 先计算了1960—2005年中任意2年的极端高温、低温、降水日数的差 $\Delta E$ , 再除以对应这两年平均气温的差 $\Delta M$ (将 $\Delta E/\Delta M$ 看为 $\Delta M$ 的函数)。这种方法的优点是减少分散的点, 使 $\Delta E/\Delta M$ 随 $\Delta M$ 的变化集中并趋于一个准常数, 并且任意2年的取法增大了样本量, 比如在1960—2005年, 就有 $46 \times 45 \div 2 = 1035$ 个独立的数据点, 是原数据点(46)的22.5倍, 这样的方法能够使统计值 $\Delta E/\Delta M$ 更具统计意义。同时, 这种方法可以有效提取一个变量对另一变量的影响(吴福婷, 2011)。

统计上, 因为独立样本量很大, 所以随着 $\Delta M$ 的增长,  $\Delta E/\Delta M$ 趋向于准常数, 该结论已在Liu et al(2009)文中得到证实。该方法也已成功应用于分析极端降水和全球气温的关系(Liu et al, 2009)。同时, 本文也检查了每一个站点的 $\Delta E/\Delta M$ 值, 其计算结果均趋于常数。此外, 下文中所得时空分布图与Li et al(2017b)文中运用不同方法得到的极端温度和降水的线性趋势结果基本一致, 验证了该方法的合理性。

以冷湖站为例, 图1为该站极端高温日数随当地平均气温的变化, 随着 $\Delta M$ 的增长,  $\Delta E/\Delta M$ 趋向于准常数, 并且标准差(垂直条)变小, 不确定性变小(图中超出显示范围的第一个垂直条的值为 $-141.1 \sim 392.3 \text{ d} \cdot \text{C}^{-1}$ )。从图1中可以看到, 当 $\Delta M$ 变化为 $2.6 \text{ C}$ 左右时,  $\Delta E/\Delta M$ 趋近 $4.4 \text{ d} \cdot \text{C}^{-1}$ , 这个有意义的准常数统计值 $\Delta E/\Delta M$ 可以由 $\Delta M$ 为最高值时获取。为了比较全国不同站点极端高温日数随平均气温的变化量, 筛选出在 $\Delta M=1 \text{ C}$ 时,  $\Delta E/\Delta M$ 已趋于准常数的站点。即若最大的 $\Delta M < 1 \text{ C}$ , 则可外推最大 $\Delta M$ 对应的 $\Delta E/\Delta M$ 值为准常数(外推值与原值差别很小可忽略); 若最大的 $\Delta M > 1 \text{ C}$ , 则比较其与 $\Delta M=1 \text{ C}$ 时对应的 $\Delta E/\Delta M$ 的值, 若相差小于5%, 则认为 $\Delta M$ 在等于 $1 \text{ C}$ 时已趋于准常数。最后得出温度每升高 $1 \text{ C}$ 时, 极端事件天数

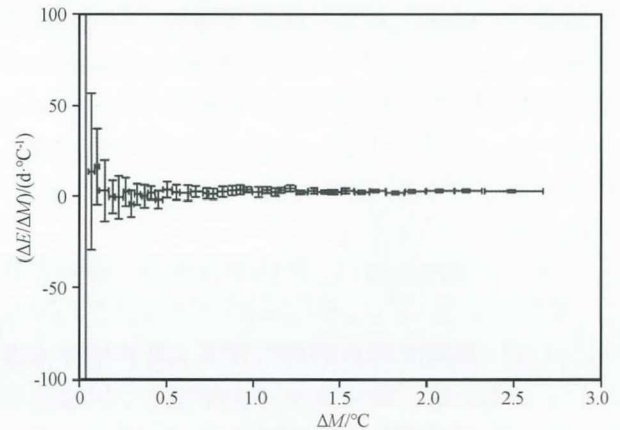


图1 冷湖站极端高温日数随当地平均气温的变化  
水平条(—)代表每20个数据为一组的温度( $\Delta M$ )变化范围;  
垂直条(I)代表这一组数据( $\Delta E/\Delta M$ )的标准差

Fig. 1 Variation of extreme high temperature days as a function of local mean temperature in Lenghu Station.

— denotes the spread of temperature  $\Delta M$  based on the set of 20 data, while I denotes the standard deviation of  $\Delta E/\Delta M$

变化的定量估计值。而随 $\Delta M$ 的增大,  $\Delta E/\Delta M$ 趋于准常数且其不确定性变小的性质, 意味着可以在一定程度上根据模式预测的平均气温来预估极端温度、降水事件的变化(Liu et al, 2009)。

## 3 中国夏季极端高温日数随平均气温变化的定量分析

### 3.1 夏季全国平均的极端高温日数随平均气温的变化

从夏季全国平均极端高温日数随全国平均气温的变化[图2(a)]可以看到, 随着夏季全国平均气温年较差( $\Delta M$ )的增大, 夏季全国平均的极端高温日数趋于一个准常数 $\Delta E/\Delta M = 3.72 \text{ d} \cdot \text{C}^{-1}$ , 此时 $\Delta M = 1.26 \text{ C}$ 并且具有相对较小的2倍标准差( $0.64 \text{ d} \cdot \text{C}^{-1}$ )。比较 $\Delta M = 1.26 \text{ C}$ 时,  $\Delta E/\Delta M$ 与 $\Delta M = 1 \text{ C}$ 时的标准差, 其差别小于5%, 因此可以说全国夏季平均气温每升高 $1 \text{ C}$ , 全国平均极端高温日数就增加3.72天左右(3.4~4.04天)。夏季全国平均极端高温日数随全球平均气温的变化[图2(b)]显示, 当全球平均气温变化最大, 即 $\Delta M = 0.68 \text{ C}$ 时,  $\Delta E/\Delta M$ 趋于准常数约为 $5.63 \text{ d} \cdot \text{C}^{-1}$ , 其两倍标准差为 $0.93 \text{ d} \cdot \text{C}^{-1}$ 。由该方法得出 $\Delta E/\Delta M$ 趋于准常数的性质可以知道,  $\Delta M$ 越大,  $\Delta E/\Delta M$ 的变化越小, 从其准常数外推的误差可忽略, 因此可以说当夏季全球平均气温每升高 $1 \text{ C}$ , 全国平均的极端高温日

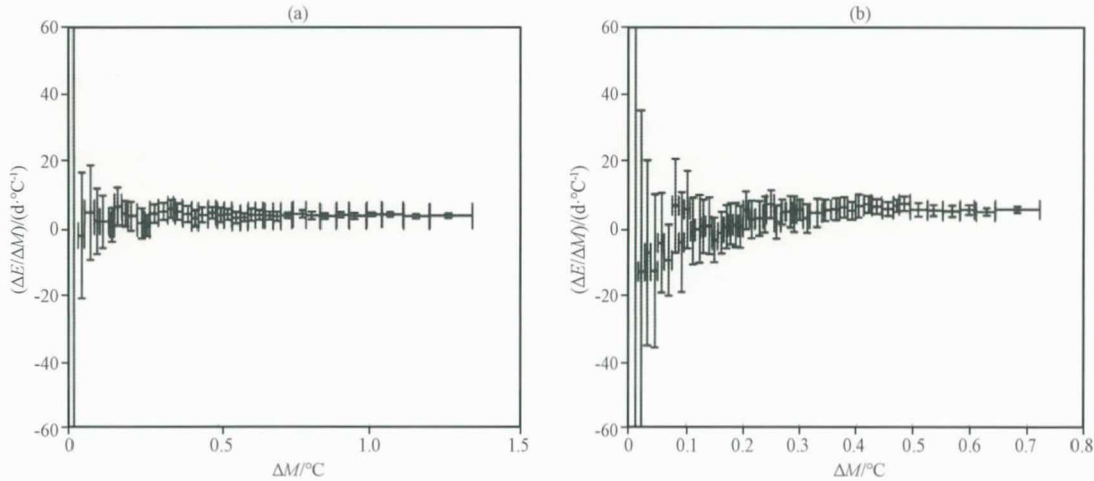


图2 夏季全国平均极端高温日数随全国平均气温(a)和全球平均气温(b)的变化

水平条(—)代表每20个数据为一组的温度( $\Delta M$ )变化范围,垂直条(I)代表这一组数据( $\Delta E/\Delta M$ )的标准差;超出图(a)显示范围第一个垂直条的值为 $-298.3\sim 82.5\text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$ ;超出图(b)显示范围的前两个垂直条的值分别为 $-420.3\sim 152.8\text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$ ,  $-73.1\sim 37.4\text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$

Fig. 2 Variation of summer extreme high temperature days averaged over mainland China as a function of mean temperature averaged over mainland China (a) or whole globe (b). — denotes the spread of temperature  $\Delta M$  based on the set of 20 data, while I denotes the standard deviation of  $\Delta E/\Delta M$ . In Fig. 2(a), the spread of I beyond the range of figure a is from  $-298.3$  to  $82.5\text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$ . In Fig. 2(a), the value of first two I beyond the range of figure b are from  $-420.3$  to  $152.8\text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$ , from  $-73.1$  to  $37.4\text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$ , respectively

数就增加5.63天左右(5.17~6.09天)。

### 3.2 中国夏季极端高温日数随平均气温变化量的空间分布

从中国夏季极端高温日数随当地平均气温变化量的空间分布[图3(a)]可以看到,极端高温日数呈现全国一致性增加分布,但量值大小有着区域性差异。极端高温日数变化量的大值区主要集中在东南沿海、高原以及西南地区。这些区域平均温度每升高 $1\text{ °C}$ ,极端高温日数增加4~9天,量值向北递减。东北和华北地区极端高温日数变化幅度次之,其平均温度每升高 $1\text{ °C}$ ,极端高温日数增加4~5天。黄淮一带,当地平均气温温度每升高 $1\text{ °C}$ ,极端高温日数相应增加3~4天。新疆地区变化量最小,即当地平均气温每升高 $1\text{ °C}$ ,该区域极端高温日数增加2~3天。

中国夏季极端高温日数随全国平均气温变化量的空间分布[图3(b)]显示,全国极端高温日数随全国平均气温的增加表现为一致增加,极端高温日数变化量的大值区主要集中在中西部地区和长三角地区,当全国平均气温每升高 $1\text{ °C}$ 时,这些地区极端高温日数增加4~6天,其中浙江和四川北部地区可达5~6天。当全国平均气温升高 $1\text{ °C}$ ,我国北方大部分地区变化量为2~4天,东北地区极端高温日数增加3~4天,新疆西北地区为2~3天。变化量小值区主要集中在黄河下游地区,其变化量只有1~

2天。中国夏季极端高温日数随全球平均气温变化量的空间分布[图3(c)]显示,全球平均气温每升高 $1\text{ °C}$ ,东北地区极端高温日数的增加量为2~8天,并由南到北递增,西北地区极端高温日数增加量为2~6天,并由西向东递增,整个内蒙以及甘肃北部地区极端高温日数增加量为6~8天。我国西南和东南地区仍然是变化量的大值区,为6~8天,广西部分地区较小为4~6天。特别的是,黄河下游部分地区变化量为负值,即当全球平均气温升高 $1\text{ °C}$ ,该地区极端高温日数减少1~2天。图3(c)这种空间大值区的分布与文献中(Li et al, 2017b)夏季平均气温与极端高温日数M-E vector结论相吻合,同时,图3(c)中的变化量较图3(a)和(b)也最大,这说明我国极端高温日数的变化对全球平均气温的响应较强。

综上所述,虽然中国各地随当地、全国平均、全球平均气温的变化量值不同,但变化大值区和小值区的位置基本相同,都表现为我国中西部和东南地区为大值集中区,而黄淮流域为小值区。可见,温度变化存在明显区域性差异。而这种差异性的影响因子较为复杂。中西部和东南地区对于平均气温升高的响应更为敏感,而黄淮流域变化较小,这可能与下垫面、地形等陆面过程的反馈有关,具体的原因值得进一步的分析。除温度变化的区域性差异外,也可以看到当全球平均气温升高 $1\text{ °C}$

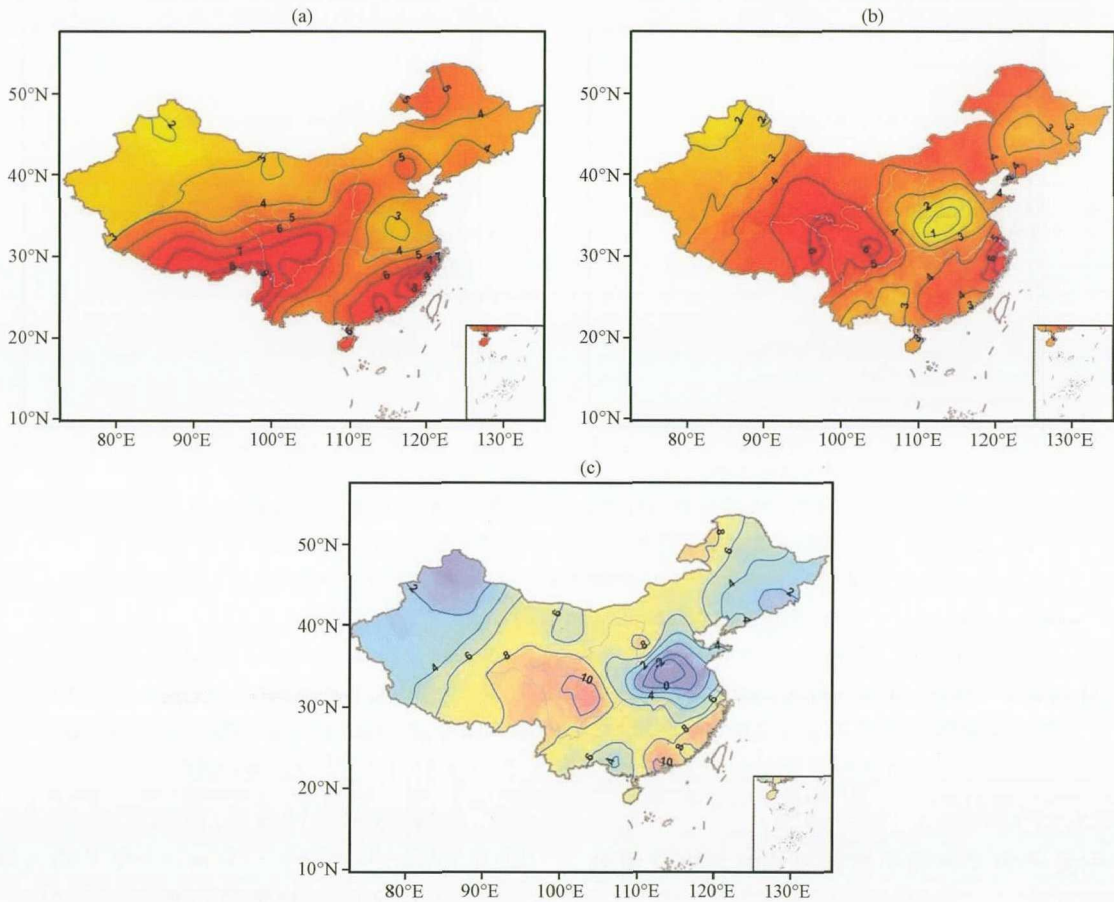


图3 中国夏季极端高温日数随当地平均气温(a), 全国平均气温(b)和全球平均气温(c)变化量的空间分布(单位:  $d \cdot ^\circ C^{-1}$ )

Fig. 3 The distribution of changes in summer extreme high temperature days averaged over mainland China as a function of local temperature (a), national mean temperature (b) and global mean temperature (c) changes. Unit:  $d \cdot ^\circ C^{-1}$

时, 部分地区在整个夏季的极端高温日数最高可增加8~10天, 这对于当地的人类生活与社会发展都将带来严峻考验。

## 4 中国夏季极端低温日数随平均气温变化的定量分析

### 4.1 夏季全国平均的极端低温日数随平均气温的变化

从夏季全国平均的极端低温日数随全国平均气温的变化[图4(a)]可以看到, 随着夏季全国平均气温的年较差增大, 夏季全国平均的极端低温日数在  $\Delta M=1.26^\circ C$  时趋于一个准常数  $\Delta E/\Delta M=-3.24 d \cdot ^\circ C^{-1}$ , 且其2倍标准差为  $0.96 d \cdot ^\circ C^{-1}$ 。即夏季当全国平均气温升高  $1^\circ C$ , 全国平均的极端低温日数减少3.24天左右(2.76~3.72天)。图4(b)为夏季全国平均的极端低温日数随全球平均气温的变化, 当  $\Delta M=0.68^\circ C$  时,  $\Delta E/\Delta M$  趋于准常数  $-5.3^\circ C$  (其两倍标准差为  $1.19 d \cdot ^\circ C^{-1}$ ), 即可以说夏季当全球平均气温每升高  $1^\circ C$ , 全国平均的极端低温日数减少5.3天左右(4.71~5.89天)。

### 4.2 夏季中国极端低温日数随平均气温变化量的空间分布

从极端低温日数随当地平均气温的变化量的空间分布[图5(a)]中可以看到, 当局地平均气温每升高  $1^\circ C$  时, 全国极端低温日数其减少1~4天, 并由北至南递减, 我国南部沿海可减少4天。图5(b)为极端低温日数随全国平均气温的变化量的空间分布, 当全国平均气温每升高  $1^\circ C$ , 我国极端低温日数减少1~4天, 但为由北至南递增, 我国南部沿海减少较小为1~2天。图5(a)与图5(b)的这种反向递减的分布, 可能与我国南北方温差气候态差异有关。极端低温日数随全球平均气温的变化量的空间分布[图5(c)]显示, 当全球平均气温每升高  $1^\circ C$ , 东北地区极端低温日数减少8~10天, 西北地区减少量为4~8天, 而长江中上游地区减少量最小, 约为2天, 我国南部沿海地区为4~6天。值得注意的是, 图5(c)的空间分布与文献中(Li et al, 2017b)夏季平均气温与极端低温日数 M-E vector 空间分布类似, 且变化量值较图5(a)和图(b)也最大, 说明我国极端低温日数也对全球平均气温变化的响应最强。

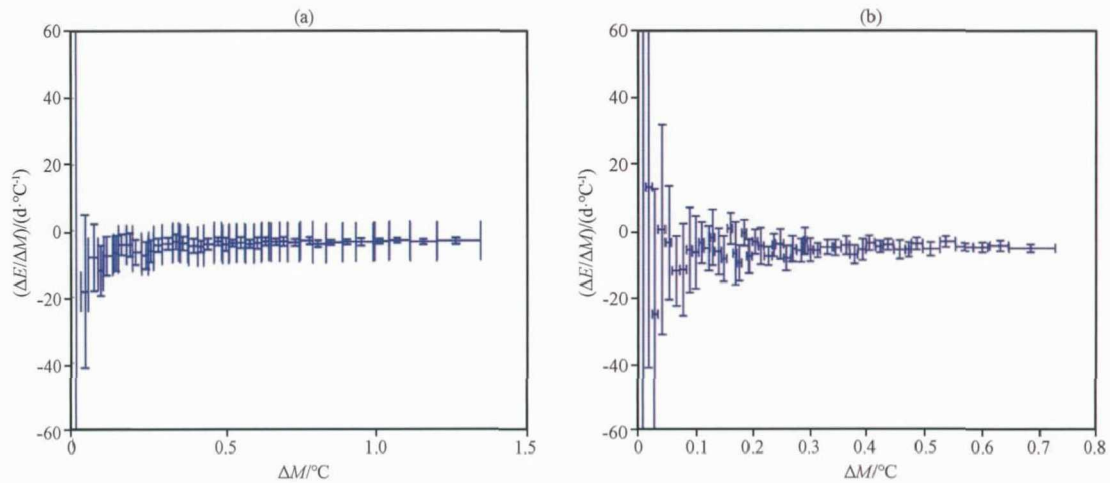


图4 夏季全国平均极端低温日数随全国平均气温(a)和全球平均气温(b)的变化  
 水平条(—)代表每20个数据为一组的温度( $\Delta M$ )变化范围,垂直条(I)代表这一组数据( $\Delta E/\Delta M$ )的标准差;  
 超出图(a)显示范围第一个垂直条的值为 $-283.1 \sim 92.6 \text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$ ;超出图(b)显示范围的前三个垂直条的  
 区间分别为 $-390.2 \sim 152.6 \text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$ ,  $-40.8 \sim 75.1 \text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$ ,  $-61.0 \sim 13.1 \text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$

Fig. 4 Variation of summer extreme low temperature days averaged over mainland China as a function of mean temperature averaged over mainland China (a) or whole globe (b). — denotes the spread of temperature  $\Delta M$  based on the set of 20 data, while I denotes the standard deviation of  $\Delta E/\Delta M$ . In Fig. 4(a), the value of the first I beyond the range of figure a is from  $-283.1$  to  $92.6 \text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$ . In Fig. 4(b), the value of first three I beyond the range of figure b are from  $-390.2$  to  $152.6 \text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$ , from  $-40.8$  to  $75.1 \text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$ , from  $-61.0$  to  $13.1 \text{ d}\cdot\text{°C}^{-1}$ , respectively

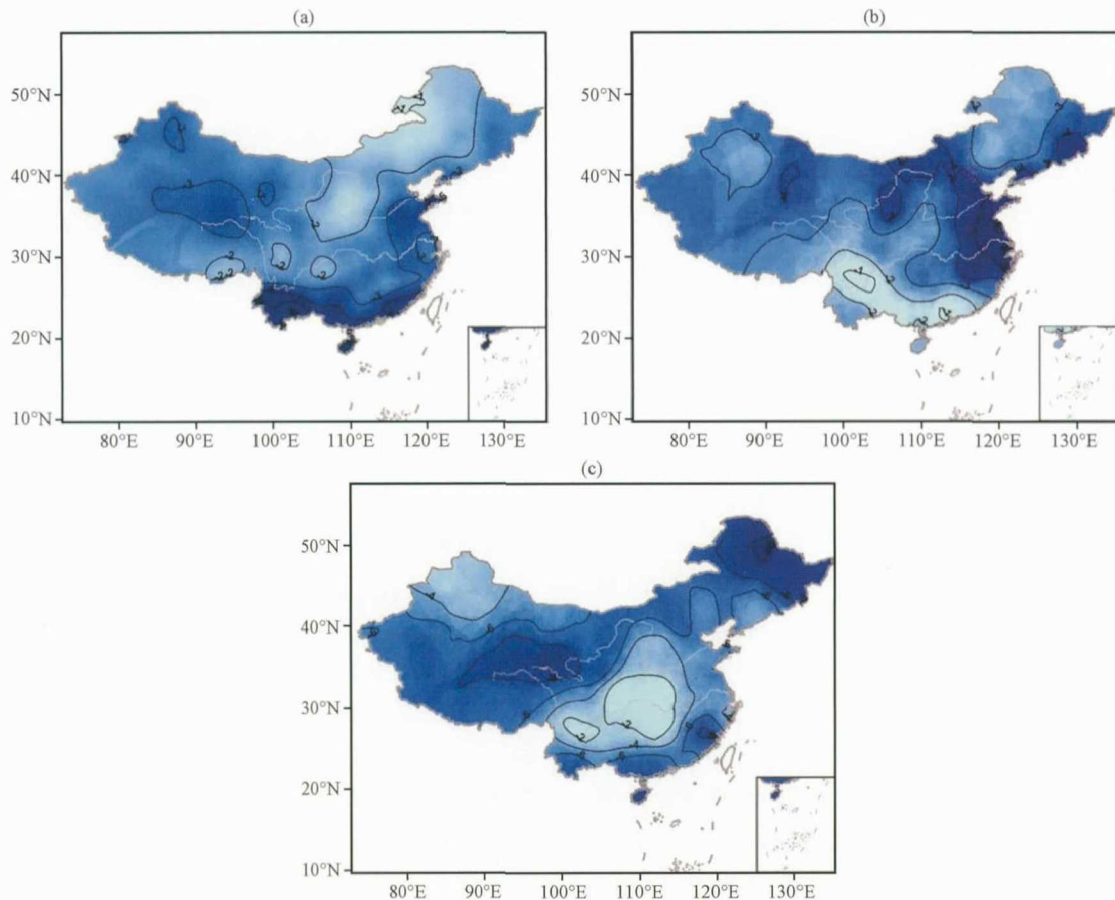


图5 中国夏季极端低温日数随当地平均气温(a)、全国平均气温(b)和全球平均气温(c)变化的空间分布(单位:  $\text{d}\cdot\text{°C}^{-1}$ )  
 Fig. 5 The distribution of changes in summer extreme low temperature days averaged over mainland China as a function of local temperature (a), national mean temperature (b), and global mean temperature (c) changes. Unit:  $\text{d}\cdot\text{°C}^{-1}$

## 5 中国夏季极端降水日数随平均气温变化的定量分析

### 5.1 夏季全国平均的极端降水日数随平均气温的变化

从夏季全国平均的极端降水日数随全国平均气温的变化[图6(a)]可以看到,随着全国平均气温年较差( $\Delta M$ )的增加, $\Delta E/\Delta M$ 趋于准常数 $0.12 \text{ d}\cdot\text{C}^{-1}$ ,但其2倍标准差为 $0.46 \text{ d}\cdot\text{C}^{-1}$ ,其不确定性

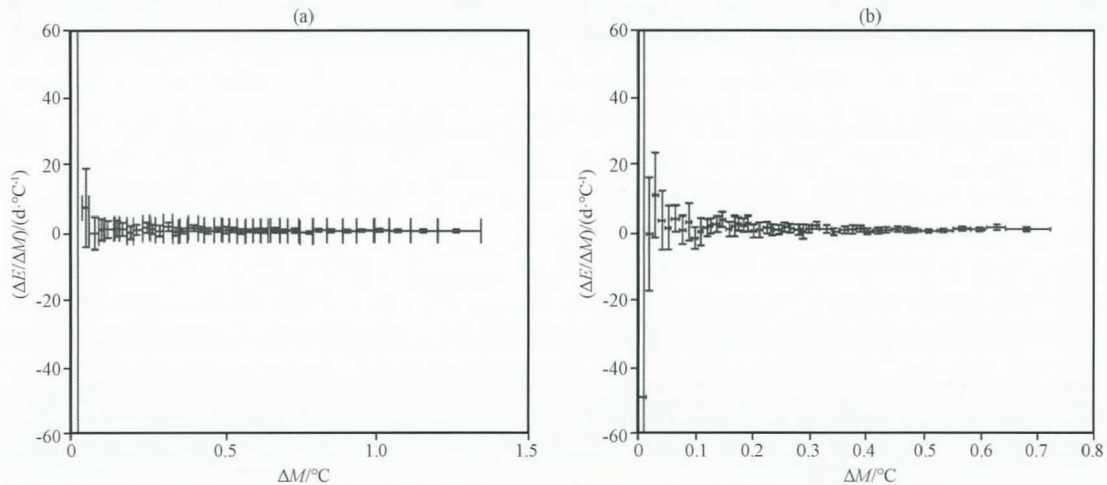


图6 夏季全国平均极端降水日数随全国平均气温(a)和全球平均气温(b)的变化

水平条(—)代表每20个数据为一组的温度( $\Delta M$ )变化范围,垂直条(I)代表这一组数据( $\Delta E/\Delta M$ )的标准差;超出图(a)显示范围的第一个垂直条的值为 $-96.6\sim 181.7 \text{ d}\cdot\text{C}^{-1}$ ;超出图(b)显示范围的第一个垂直条的值为 $-209.3\sim 160.2 \text{ d}\cdot\text{C}^{-1}$

Fig. 6 Variation of summer extreme precipitation days averaged over mainland China as a function of mean temperature averaged over mainland China (a) and whole globe (b). — denotes the spread of temperature  $\Delta M$  based on the set of 20 data, while I denotes the standard deviation of  $\Delta E/\Delta M$ . In Fig. 6(a), the value of the first I beyond the range of figure a is from  $-96.6$  to  $181.7 \text{ d}\cdot\text{C}^{-1}$ . In Fig. 6(b), the value of the first I beyond the range of figure b is from  $-209.3$  to  $160.2 \text{ d}\cdot\text{C}^{-1}$

### 5.2 夏季中国极端降水日数随平均气温变化量的空间分布

从极端降水日数随当地平均气温的变化量的空间分布[图7(a)]中可以看出,全国极端降水日数随当地平均气温变化量较小,当地气温升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,东北大部分地区、华北南侧、华东大部分地区以及新疆地区极端降水日数增加 $0\sim 1$ 天,云南部分地区增加 $1\sim 2$ 天,而其余地区减少 $0\sim 1$ 天。全国极端降水日数随全国平均气温的变化量也较小[图7(b)],全国平均气温升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,东北、黄河下游、华南以及西北大部分地区极端降水日数增加 $0\sim 1$ 天,其余地区减少 $0\sim 1$ 天。极端降水日数随全球平均气温的变化量的空间分布[图7(c)]显示,变化量的大值区集中在新疆西侧,全球平均气温升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,该区域极端降水日数增加 $2\sim 6$ 天,东北北侧、江淮地区地区、华南大部分地区增加 $2$ 天左右,而华北大部分

较大。即当夏季全国平均气温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,全国平均的极端降水日数增加 $0.12$ 天,相对于极端高、低温日数的变化较小。图6(b)为夏季全国平均的极端降水日数随全球平均气温的变化,当全球平均气温升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,极端降水日数增加 $0.69$ 天(其2倍标准差为 $0.62 \text{ d}\cdot\text{C}^{-1}$ )。从全国平均的角度来看,无论是随全国还是全球平均气温的变化,我国极端降水日数虽有所增加,但量值很小,且其不确定性相对较大。

地区极端降水日数减少 $2$ 天左右,其余地区变化不大。可以注意到,极端降水日数对全球平均气温的响应相对于局地或全国平均气温的响应较大,且变化量相对较大,这说明我国极端降水日数也对全球平均气温变化的响应更强。

## 6 模式数据分析

根据上述统计分析可知,无论是从全国平均的角度还是从全国空间分布来看,我国夏季极端高温、低温、降水频率对于全球平均气温变化的响应都十分显著,那么在全球变暖背景下,我国极端温度和降水频率究竟会发生怎样的变化,本节将结合模式模拟,预估全球平均气温结果,分析我国极端高低温及降水频率的变化。

图8为各模式模拟的1906—2005年夏季全球平均表面气温距平,以及三种情景下2006—2099年夏

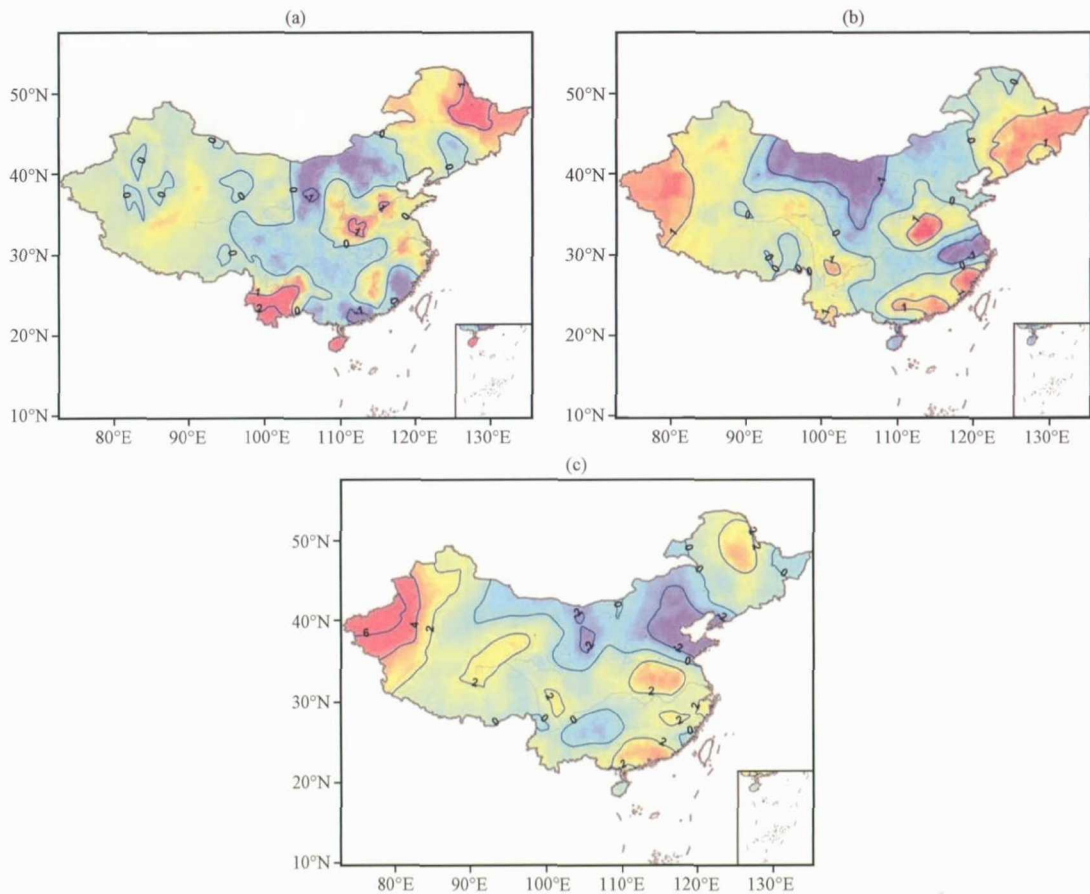


图7 中国夏季极端降水日数随当地平均气温(a)、全国平均气温(b)和全球平均气温(c)变化的空间分布(单位:  $d \cdot ^\circ C^{-1}$ )

Fig. 7 The distribution of changes in summer extreme precipitation days averaged over mainland China as a function of local temperature (a), national mean temperature (b) and global mean temperature (c) changes. Unit:  $d \cdot ^\circ C^{-1}$

季全球平均表面气温距平, 5个模式都表明无论是历史还是未来夏季全球平均表面气温距平都呈现增加趋势。根据五个模式集合平均的结果(见表2), 过去100年全球夏季平均气温增加 $0.82^\circ C$ 左右。基于之前分析的结果, 全球平均气温升高 $1^\circ C$ , 全国平均的极端高温日数增加 $5.63 d \cdot ^\circ C^{-1}$ , 也就是说与100年前相比, 全国平均的极端高温日数已增加了4天左右。类似的, 近100年来全国平均的极端低温日数减少4天左右, 而全国平均的极端降水日数变化较小, 只增加0.5天左右。在RCP2.6情景下, 2006—2099年夏季全球平均气温升高 $0.66^\circ C$ , 全国平均极端高温日数增加3天左右, 全国平均极端低温日数减少3天左右, 而全国平均极端降水日数只增加0.3天。在RCP4.5情景下, 2006—2099年夏季全球平均气温升高 $1.85^\circ C$ , 全国平均极端高温日数增加10天左右, 全国平均极端低温日数减少10天左右, 而全国平均极端降水日数增加1天。RCP8.5情景下2006—2099年夏季全球平均气温上升 $4.25^\circ C$ , 全国平均极端高温日数增加23天左右, 全国平均极端低温日数减少

22天左右, 而全国平均极端降水日数增加3天。同样的, 可以根据全球平均气温变化进一步推断全国各区域相应极端高温、低温、降水事件频率的变化。在RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5情景下, 从各极端指数变化大值区来看, 2006—2099年我国东南以及西南地区极端高温日数可增加7, 18和42天左右, 我国北方大部分地区极端低温日数减少5, 14和33天左右, 而西北地区极端降水日数可增加3, 7和16天左右。

## 7 结论与讨论

定量估计了中国夏季极端高温、低温、降水日数随当地、全国、全球平均气温变化的变化量。主要结论如下:

(1) 全国平均气温升高 $1^\circ C$ , 全国平均的极端高温、低温、降水日数的变化量分别为3.72, -3.24和0.12天; 全球平均气温升高 $1^\circ C$ , 全国平均的极端高温、低温、降水日数的变化量分别为5.69, -5.3和0.69天。相对于极端温度事件, 极端降水事件的频率对平均气温变化的响应要弱的多。



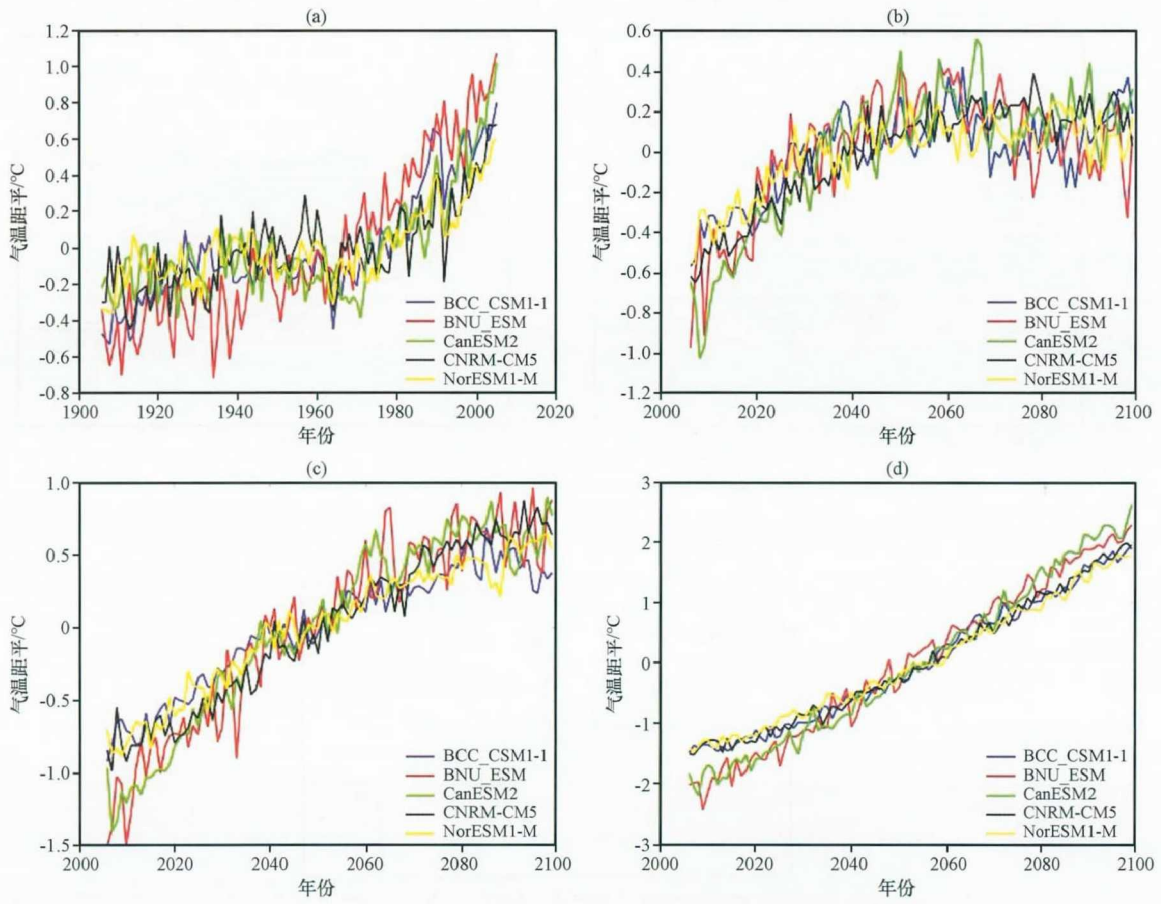


图8 模式模拟(a, 1906—2005年)及RCP2.6情景(b)、RCP4.5情景(c)和RCP8.5情景(d)下  
 预估(2006—2099年)的夏季全球平均表面气温距平  
 气候态参考时段1980—1999年

Fig. 8 Global mean surface temperature anomaly from historical run (a, from 1906 to 2005), and under RCP2.6 (b), RCP4.5 (c) and RCP8.5 (d) scenario (from 2006 to 2099). The 1980—1999 mean is referent to as the climatological mean

表2 模式历史模拟以及三种情景下夏季全球平均表面气温变化趋势

Table 2 The trend of the global mean temperature of the historical run and under three scenarios, numbers in the bracket denote the range of uncertainty

模式名称	历史模拟	夏季全球平均表面气温变化趋势/[°C·(100a) <sup>-1</sup> ]		
		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
BCC_CSM1.1	0.91	0.51	1.41	3.88
BNU_ESM	1.37	0.57	2.19	4.90
CanESM2	0.71	0.94	2.19	4.98
CNRM-CM5	0.61	0.82	1.91	3.86
NorESM1-M	0.50	0.48	1.54	3.60
集合平均	0.82 (0.67~0.97)	0.66 (0.57~0.75)	1.85 (1.69~2.01)	4.25 (3.96~4.54)

括号中数值代表不确定性范围

(2) 不同地区极端高温、低温、降水事件对平均气温变化的变化量不同。本研究以当地、全国、全球平均气温的变化为自变量,定量估计了极端高温、低温、降水事件的变化量。当地气温升高1°C,极端高温日数在东南、西南地区增加量最大为6~8天,而在黄河下游和新疆地区增加量最小为

2~3天;而极端低温日数减少量由北至南递增,在华南地区减少量可达4天左右;极端降水日数的变化量较小,基本在-1~2天,频数增加区位于东北和云南地区,其余地区频数减少。全国平均气温升高1°C,全国大部分地区极端高温日数增加3~4天,东南、西南地区极端高温日数可增加5~6天,黄淮

流域增加量最小仅为1~2天;而极端低温日数呈全国一致的减少,其减少量并由北至南递减,北方地区最大为4天左右;极端降水日数变化量很小,除东北、黄淮、华南、新疆地区有所增加外,其余地区都为减少。相对于当地平均气温和全国平均气温的变化,极端高温、低温、降水事件对于全球平均气温的相应更强。全球平均气温升高1℃,黄淮地区极端高温事件减少1~2天,东南沿岸和四川地区增加量高达8~10天,东北、新疆地区增加2~4天,其余大部分地区增加4~6天;极端低温日数仍然是一致的减少,减少量的小值区位于我国中部仅为2~3天,东北地区减少量可达10天左右,其余地区减少量为4~8天。极端降水日数在西北地区增加最多,可达4~6天,中国东部35°N以南次之,为2天左右,其余地区大都有微弱的减少。

(3) 基于模式模拟历史和预估未来夏季全球平均气温的结果,可知在过去100年我国平均的极端高温、低温、降水日数分别增加4天、减少4天、增加0.5天。对于2006—2009年的预估,不同情景下情况不同。在RCP2.6情景下,我国平均的极端高温、低温、降水日数分别增加3天、减少3天、增加0.3天;RCP4.5情景下,我国平均的极端高温、低温、降水日数分别增加10天、减少10天、增加1天;在RCP8.5情景下,我国平均的极端高温、低温、降水日数分别增加23天、减少22天、增加3天。从全国分布变化量的大值区来看,在RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5情景下,2006—2009年,我国东南以及西南地区极端高温日数可分别增加7,18和42天左右,我国北方大部分地区极端低温日数分别减少5,14和33天左右,而西北地区极端降水日数分别增加3,7和16天左右。RCP8.5情景下平均气温的剧烈增长使极端高温事件增加量可高达42天左右,这意味着减排等一系列应对气候变化的措施势在必行。

尽管目前模式已经有了很大的进展,但其不确定性仍然存在(Li et al, 2017a)。模式气候模拟的不确定性来源于自然变率也来源于模式自身,其中与自然内在变率相关的不确定性不可能减少。这种与自然变率相关的不确定性在模式预估中仍然存在。同时,因为观测历史中全球平均气温与极端高温、低温、降水日数的关系,在未来也可能发生变化,因此本文提出的定量分析的方法,虽然在一定时间段内是适用的,但也存在一定的不确定性。虽然模式模拟和预估以及定量分析都存在一定的不确定性,但是温室气体的浓度情景对于极端温

度、降水事件的频率,尤其是极端温度事件的频率的重要影响是显而易见的。如按照RCP8.5情景下的预估发展,2006—2009年夏季全国平均极端高温事件最多增加42天左右,为夏季总日数的近一半,这将对社会和经济带来难以估计的损失。

#### 参考文献:

- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al, 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111 (D5): D05109.
- Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al, 2010. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada [J]. *Journal of Climate*, 14 (9): 1959–1976.
- Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al, 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111: D12106.
- Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, et al, 1999. Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change [J]. *Climatic Change*, 42 (1): 243–283.
- Haylock M R, Peterson T C, Alves L M, et al, 2006. Trends in total and extreme south american rainfall in 1960 2000 and links with sea surface temperature [J]. *Journal of Climate*, 19 (8): 1490–1512.
- Horton E B, Folland C K, Parker D E, 2001. The Changing incidence of extremes in worldwide and central England temperatures to the end of the twentieth century [J]. *Climatic Change*, 50 (3): 267–295.
- Jones P D, Horton E B, Folland C K, et al, 1999. The use of indices to identify changes in climatic extremes [J]. *Climatic Change*, 42 (1): 131–149.
- Kothawale D R, Revadekar J V, Kumar K R, 2010. Recent trends in pre-monsoon daily temperature extremes over India [J]. *Journal of Earth System Science*, 119 (1): 51–65.
- Li J, Zhu Z, Dong W, 2017a. Assessing the uncertainty of CESM-LE in simulating the trends of mean and extreme temperature and precipitation over China [J]. *International Journal of Climatology*, 37 (4): 2101–2110.
- Li J, Zhu Z, Dong W, 2017b. A new mean-extreme vector for the trends of temperature and precipitation over China during 1960 - 2013 [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 129 (3): 273–282.
- Li Z, Yan Z, 2009. Homogenized daily mean/maximum/minimum temperature series for China from 1960—2008 [J]. *Atmospheric and Ocean Science Letters*, 2 (4): 237–243.
- Liu S C, Fu C, Shiu C J, et al, 2009. Temperature dependence of global precipitation extremes [J]. *Geophysical Research Letters*, 36 (17): L17702. DOI: 10.1029/2009GL040218.
- Tank A, Konnen G P, 2002. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–99 [J]. *Journal of*

- Climate, 16 (22): 3665–3680.
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A, 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (4): 485–498.
- Yan Z W, Jones P D, Davies T D, et al, 2002. Trends of extreme temperatures in Europe and China based on daily observations[J]. *Climatic Change*, 53 (1): 355–392.
- 李培都, 司建华, 冯起, 等, 2018. 1958–2015年敦煌及周边地区极端降水事件的时空变化特征[J]. *高原气象*, 37 (2): 535–544. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00055.
- 马佳宁, 高艳红, 2019. 近50年黄河上游流域年均降水与极端降水变化分析[J]. *高原气象*, 38 (1): 124–135. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00126.
- 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 (增刊): 11–20.
- 王岱, 游庆龙, 江志红, 等, 2016. 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*, 35 (5): 1352–1363. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00019.
- 吴福婷, 2011. 近几十年中国降水谱和极端降水的变化趋势及其与全球变暖关系的分析[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所.
- 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 (增刊): 1–10.

## Quantitative Analysis of Changes of Summer Extremes Temperature and Precipitation Days over China with Respect to the Mean Temperature Increase

LI Juan<sup>1</sup>, YAN Huiping<sup>1</sup>, ZHU Zhiwei<sup>1,2</sup>

(1. *Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;*

2. *Huaihe River Basin Meteorological Center, Hefei 230031, Anhui, China)*

**Abstract:** The frequency of extreme high temperature, extreme low temperature and extreme precipitation are to a large extent the response to the global mean temperature. Using the Homogeneous temperature data at 549 stations and precipitation data at 559 stations over China, the changes of summer extremes temperature and precipitation days over China with respect to the mean temperature increase are quantitative analyzed. Results show that: The national average changes of extreme high temperature, extreme low temperature and extreme precipitation days are 5.69, -5.3 and 0.69 days for every Celsius degree increase of the global mean temperature; From regional aspect, for every Celsius degree increase of the global mean temperature, the extreme high temperature days increased 8~10 days in southeastern China and Sichuan province, the extreme low temperature days decreased 10 days in northeastern China, and the number of days of extreme precipitation in the northwest of China has the greatest increase that reaches 4~6 days. Based on above results, using projected global mean temperature from five global coupled climate models, the amount of variation of these climate extremes is largest under RCP8.5 (Representative Concentration Pathways 8.5) scenarios. Under RCP8.5 scenarios, the national average of the number of days of extreme high temperature, extreme low temperature and extreme precipitation in China will increase 23 days, decrease 22 days and increase 3 days respectively in the next 100 years. As to region, the number of days of extreme high temperature will increase 42 days in the south of China, the number of days of extreme low temperature will decrease 33 days in the north of China and the number of days of extreme precipitation will increase 16 days in the northwest of China under RCP8.5 scenarios in the next 100 years. The above results suggest that a series of measures tackling climate change are imperative.

**Key words:** Extreme high temperature days; extreme low temperature days; extreme precipitation days; mean temperature; quantitative analysis