

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.018.

蒋帅, 张黎, 景元书, 等. 1981—2015年中国区域极端气候事件的时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 295-306.

Jiang Shuai, Zhang Li, Jing Yuanshu, et al. Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Regional Extreme Climate Events in China from 1981 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 295-306.

# 1981—2015年中国区域极端气候事件的时空分布特征

蒋帅<sup>1,2</sup>, 张黎<sup>2,3,4</sup>, 景元书<sup>1</sup>, 李攀<sup>5</sup>, 任小丽<sup>2,3</sup>, 何洪林<sup>2,3,4</sup>

(1.南京信息工程大学 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2.中国科学院 地理科学与资源研究所  
生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3.国家生态科学数据中心, 北京 100101;  
4.中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100190; 5.天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072)

**摘要:** [目的] 阐明中国区域连续时空范围内极端气候事件的高发区域和时段, 增强对我国极端气候事件发生规律的认知, 进而为人类社会减缓和适应气候变化提供重要科学依据。 [方法] 基于 CRUNCEP 的温度和降水量数据, 在 1.5 倍标准差极端值判别法的基础上结合连续时空极端事件分析方法, 分析了 1981—2015 年中国区域不同类型极端气候事件的变化规律特征。 [结果] (1) 全国极端降水和温度事件出现年份的极端气候事件具有明显的区域差异性。1983 年、1998 年、2012 年为全国极端强降水年, 极端强降水事件的主要发生区域分别位于长江中下游、长江上游和内蒙古东部, 以及长江中下游和内蒙古地区。对于全国极端干旱年、1986 年全国大部分区域均较常年偏干, 而 2011 年干旱区域集中出现在亚热带—热带季风气候区。全国极端高温和极端低温年分别出现在 1998 年、2012 年, 其中 1998 年全国大部分地区温度偏高, 而 2012 年极端低温事件主要发生于温带大陆性气候区。(2) 1981—2015 年, 46% 的极端强降水事件发生在 2001—2015 年; 13% 的极端干旱事件发生在 2001—2015 年的亚热带—热带季风气候区; 极端高温事件频发于 1991—2000 年 (42%) 和 2001—2015 年 (43%); 21% 的极端低温事件发生在 2001—2015 年的温带大陆性气候区。(3) 复合极端气候事件出现比例存在逐年代际递增的趋势, 其中极端低温强降水事件出现比例最高 (34%), 并且主要集中在 2001—2015 年 (23%)。 [结论] 单因子极端气候和复合极端气候事件在中国四大气候区具有较强的差异性, 未来应加强分析中国区域日、月等短时间尺度上极端气候事件的时空分布特征。

**关键词:** 极端气候事件; 连续时空极端事件; 气候区; 复合极端事件

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0295-12

## Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Regional Extreme Climate Events in China from 1981 to 2015

Jiang Shuai<sup>1,2</sup>, Zhang Li<sup>2,3,4</sup>, Jing Yuanshu<sup>1</sup>, Li Pan<sup>5</sup>, Ren Xiaoli<sup>2,3</sup>, He Honglin<sup>2,3,4</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agrometeorology, Nanjing University of Information Sciences and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. National Ecosystem Science Data Center, Beijing 100101, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 5. School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to clarify the high incidence areas and time periods of extreme climate events within a continuous spatiotemporal range in the Chinese region, enhance understanding of the occurrence patterns of extreme climate events in China, and provide an important scientific basis for human society to mitigate and adapt to climate change. [Methods] We analyzed the spatiotemporal distribution characteristics of different types of extreme climate events in China from 1981 to 2015, using both the 1.5

收稿日期: 2022-08-18

修回日期: 2022-11-02

资助项目: 国家自然科学基金 (31971512; 42141005; 42030509)

第一作者: 蒋帅 (1995—), 男, 安徽亳州人, 硕士, 研究方向为气象灾害预警与预测。E-mail: 674758323@qq.com

通信作者: 张黎 (1982—), 女, 安徽泾县人, 博士, 副研究员, 主要从事陆地生态系统碳循环模拟研究。E-mail: li.zhang@igsrr.ac.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

times standard deviation and the continuous spatiotemporal extreme event analysis method based on the temperature and precipitation data of CRUNCEP. [Results] There were different regional patterns of extreme climate events in those years experiencing extreme annual precipitation and air temperature events for the whole country. For the years with extreme heavy annual precipitation in 1983, 1998 and 2012, extreme heavy annual precipitation events mainly occurred in the middle and lower reaches of the Yangtze River, the upper reaches of the Yangtze River and eastern Inner Mongolia, and the middle and lower reaches of the Yangtze River and Inner Mongolia, respectively. The national extreme drought event existed in 1986 and 2011. Most regions of the country were drier than that in normal years in 1986, while the extreme drought events mainly occurred in the subtropical and tropical monsoon climate region in 2011. The extreme high temperature and extreme low temperature events occurred in 1998 and 2012, respectively. The mean air temperature in most parts of the country was higher than usual in 1998. The extreme low temperature events in 2012 occurred frequently in the temperate continental climate region. During 1981—2015, 46% of extreme heavy precipitation events occurred in 2001—2015. There were 13% of extreme drought events which occurred in the subtropical tropical monsoon climate region from 2001 to 2015. Extreme high temperature events occurred frequently in 1991—2000 (42%) and 2001—2015 (43%). There were 21% of extreme low temperature events which occurred in the temperate continental climate region from 2001 to 2015. The proportion of compound extreme climate events had a decadal increasing trend. The extreme low temperature and heavy precipitation events had the highest proportion (34%), and concentrated in 2001—2015 (23%). [Conclusion] That single-factor extreme climate events and composite extreme climate events have strong differences in the four major climate zones in China. In the future, it is necessary to strengthen the analysis of the spatiotemporal distribution characteristics of extreme climate events on short time scales such as day and month in regions of China.

**Keywords:** extreme climate events; continuous spatiotemporal extreme events; climatic regions; compound extreme events

极端气候事件表现为某地气候状态严重偏离其平均状态,具有突发性、难预测性和强破坏性等特点。在全球变化背景下,近几十年来极端气候事件具有不断增多增强的趋势。例如,1998年中国强降水引发的洪涝灾害<sup>[1]</sup>、2003年欧洲高温热浪事件、2005年和2010年亚马逊地区的严重干旱、2008年中国中南部低温事件等<sup>[2]</sup>。并且,根据国际耦合模式比较计划(Coupled Model Inter-comparison Project phase, CMIP)第5阶段(CMIP5)对极端降水和极端气温的预估结果<sup>[3]</sup>,预计今后极端气候事件的发生会更加频繁<sup>[4]</sup>。极端气候事件的发生不仅影响全球粮食安全和水资源供需,还在很大程度上影响生态系统生产力和全球碳循环。定量分析极端气候事件的时空分布特征是评估极端气候事件对生态系统和人类社会影响的重要基础。

国内外学者通常采用发生概率低于10%或更低<sup>[5]</sup>、距平值大于1倍以上标准偏差、超过或低于极端阈值等方法<sup>[6]</sup>来判别极端气候事件。此外,大量研究选取极端气温指数和极端降水指数等代用气候指数,通过计算极端气候指数来分析极端气候事件的时空分布特征。其中,世界气象组织提出的16个极端

气温指数和11个极端降水指数得到广泛应用<sup>[7]</sup>。1951—2000年中国长江中下游地区极端强降水事件发生频率显著增多,而华北地区显著减少<sup>[8]</sup>。华东地区极端高温事件发生频率的空间特征以北低南高和东低西高为主<sup>[9]</sup>。西南地区极端降水具有明显的梯度变化特征,该地区总降水量在减少,而降水强度在增加<sup>[10]</sup>。根据政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第4次评估报告提供的7个模式集合预测结果,我国21世纪极端降水强度可能增大,而且干旱也将会加重<sup>[11]</sup>。

随着全球变化背景下极端气候事件的不断增多,国内外关于极端气候事件对陆地生态系统影响的研究也不断增多<sup>[12]</sup>。2000—2004年北美西部极端干旱事件导致该地区“碳汇”的强度大幅下降,下降幅度30~298 Tg C/a<sup>[13]</sup>。2008年中国南方极端低温事件导致植被发育缓慢、死亡率增加<sup>[14]</sup>。2013年我国南方的极端高温和干旱事件造成生态系统碳汇急剧下降,农作物大量减产,极端的高温 and 干旱成为该地区碳汇年际变化的主要控制因子<sup>[15]</sup>。然而,目前中国区域极端气候事件研究大多偏重于极端气候事件的

个例分析,以及极端气候指数的时空变化特征等方面,缺乏对于连续时空范围内中国极端气候事件高发区域和时段的定量研究,不能很好地支撑极端气候事件对中国生态系统状态变化影响方面的研究。

本文对 CRUNCEP (Climatic Research Unit-National Centers for Environmental Prediction)全球气候数据集提取中国及四大气候区的温度和降水量数据,在 1.5 倍标准偏差的极端值判别法的基础上结合连续时空极端事件分析方法,分析 1981—2015 年中国区域极端温度、极端降水和复合极端事件发生的频率和强度,阐明单因子极端气候和复合极端气候事件的时空分布特征,比较不同类型极端气候事件在不同气候区的差异性,为深入研究极端气候事件对生态系统过程、功能和服务变化的影响以及极端气候风险评估、灾害预警等研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国幅员辽阔,气候多样,可分为 4 个气候区,即温带大陆性气候区(I)、温带季风气候区(II)、高原山地气候区(III)和亚热带-热带季风气候区(IV)<sup>[16]</sup>。温带大陆性气候区(I)远离海洋,大陆性强,全年降水较少,冬季温差大。温带季风气候区(II)位于秦岭淮河线以北,贺兰山、阴山、大兴安岭以东以南,受夏季风影响较大,夏季高温多雨,冬季低温少雨。高原山地气候区(III)大部分区域位于海拔较高的山地、高原地区,全年温度较低,降水量少。亚热带-热带季风气候区(IV)位于秦岭淮河线以南,夏季高温多雨,冬季温和少雨。中国及四大气候区的多年平均气候指标见表 1,表中数据为基于 CRUNCEP 数据集计算得到的 1981—2015 年年平均气温、年降水量和短波辐射的多年平均值。

表 1 中国及四大气候区多年平均气候指标  
Table 1 Annual average climate indicators of China and the four major climate regions

1981—2015 年	年平均 气温/℃	年降水量/ mm	短波辐射/ (W·m <sup>-2</sup> )
中国	7.03	544	193.9
温带大陆性气候区(I)	6.91	170	194.9
温带季风气候区(II)	6.32	546	182.1
高原山地气候区(III)	-1.33	303	201.0
亚热带-热带季风气候区(IV)	16.84	1278	194.7

1.2 气象数据

CRUNCEP 数据集是由美国国家大气研究中心对空间分辨率为 0.5°、月尺度的全球气候数据集 CRU(Climatic Research Unit)<sup>[17]</sup>与空间分辨率为 2.5°,时间分辨率为 6 h 的 NCEP(National Centers

for Environmental Prediction)<sup>[18-19]</sup>全球大气再分析数据进行融合得到。该数据集的气象数据具有时间序列长(1948—2016 年)、时间和空间分辨率高(6 h, 0.5°)且经过严格的时间均一性检验等优点,被广泛用于驱动通用陆面模式 CLM(Community Land Model)等陆面模式,以及包括全球碳计划组织的模型比较计划 TRENDY(Trends in Net Land-Atmosphere Carbon Exchange)在内的全球和区域植被生长、蒸散、生产力、碳收支等动态变化模拟研究,也已被广泛应用于中国区域的气候变化研究<sup>[20]</sup>。其中,CRU 数据来源于世界气象组织各个国家的交换资料,大约覆盖了 2 400 个监测站,数据时段为 1901—2002 年,气候要素包括气温、降水量、湿度、云量和潜在蒸腾等。NCEP 再分析数据集是采用当今最先进的全球资料同化系统对各种来源的观测资料进行质量控制和同化处理得到,数据时段为 1948—2016 年,气候要素包括气温、降水量、辐射、大气压强和风速等。

本文使用的 1981—2015 年气温和降水量数据来源于 CRUNCEP 第 7 版数据集。利用 Matlab 软件从 CRUNCEP 数据集中读取中国区域 6 h 分辨率的气温和降水量数据,计算得到中国陆地区域、1981—2015 年逐年平均气温和年降水量,用于极端气候事件的统计分析。与 He 等<sup>[21]</sup>研发的中国区域地面气象要素驱动数据集相比,二者的年平均气温和年降水量数据具有显著( $p<0.05$ )的一致性,相关系数分别为 0.96,0.78。

1.3 极端气候事件的统计方法

首先对 1981—2015 年期间的年平均气温和年降水量全国平均值进行线性趋势拟合,计算出全国逐年的去趋势距平值。去趋势距平值为该年的年平均气温或降水量实际值减去线性拟合值的差值<sup>[22]</sup>。然后,采用 1.5 倍标准差方法识别全国尺度的极端温度事件、极端降水事件出现年份,即将气温和降水量去趋势距平值大于 1.5 倍标准偏差的年份分别定义为极端高温年和极端强降水年,将气温和降水量去趋势距平值小于-1.5 倍标准偏差的年份定义为极端低温年和极端干旱年。

进一步对全国每个空间网格的 1981—2015 年期间年平均气温和年降水量数据进行线性趋势拟合,计算出每个网格的逐年去趋势距平值,采用连续时空极端事件分析方法对 35 a 全国 3 840 个空间网格共计 134 400 个去趋势距平值数据进行统计分析,从而识别出连续时空范围内的极端气候事件。

连续时空极端事件分析方法<sup>[23]</sup>基于变量的去趋势距平值的全局概率密度函数,定义了一个阈值  $q$ ,分别用  $q$  以上(正极端)和 $-q$  以下(负极端)的时空连续值作为



极端事件。与传统方法相比,该方法的优势是能够较好地连续时空范围内极端气候事件高发区域和时段进行定量分析,在极端气候事件对植被生长、生态系统碳循环影响研究方面得到了广泛应用<sup>[24-25]</sup>。

为了保证不同区域之间极端事件的可比性,本研究对气温、降水量的去趋势值除以其标准差进行归一化。将归一化后的气温和降水量去趋势距平值的百分位数大于95%的时空像元分别定义为极端高温事件和极端强降水事件,将百分位数小于5%的时空像元定义为极端低温事件和极端干旱事件。既属于极端气温事件又属于极端降水事件的事件定义为复合极端气候事件,包括极端高温强降水事件、极端高温干旱事件、极端低温强降水事件和极端低温干旱事件。

为分析不同类型极端气候事件的年代际演变特征,根据连续时空极端事件分析方法识别出的极端气候事件,进一步统计3个不同时段单因子和复合极端气候事件出现的比例。

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{m} \quad (1)$$

式中: $P_{ij}$ 为某一时段某一气候区单因子极端气候事件出现次数占总时段该单因子极端气候事件出现总次数的比例; $i$ 为3个时间段; $j$ 为四大气候区; $n_{ij}$ 为某一时段某一气候区单因子极端气候事件出现次数; $m$ 为总时段单因子极端气候事件出现总次数。

$$P_{ik} = \frac{A_{ik}}{B} \quad (2)$$

式中: $P_{ik}$ 为某一时间段某种复合极端事件出现次数

占4种类型复合极端事件出现总次数的比例; $k$ 为4种类型复合极端事件; $A_{ik}$ 为某一时间段某种复合极端事件出现次数; $B$ 为总时间段4种类型复合极端事件出现总次数。

基于MATLAB编程语言,计算得到单因子和复合极端气候事件出现的次数。分别利用ArcGIS 10.2软件和Origin软件绘制极端气候事件的空间分布图和气温/降水量时间去趋势距平折线图。基于SPSS 24.0软件采用t检验的方法对气温/降水量数据的线性趋势进行显著性检验,当 $p < 0.05$ 表示具有显著性,否则不具备显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 极端降水事件时空分布特征

1981—2015年中国年降水量范围为488~609 mm,多年平均值为544 mm,总体上没有显著变化趋势( $p = 0.841$ )。图1为1981—2015年中国和四大气候区降水量去趋势距平值的动态变化,除了高原山地气候区外,另3个气候区均与全国具有显著的相关性,其中亚热带-热带季风气候区降水量年际波动最大,相关性最强( $R = 0.73, p < 0.001$ )。基于1.5倍标准差的极端值判别方法,全国极端强降水年分别发生在1983年、1998年和2012年,降水量去趋势距平值分别为45, 65, 45 mm,其中1998年降水量去趋势距平值达到2.3倍的标准差;极端干旱年份分别发生在1986年和2011年,降水量去趋势距平值分别为-52, -59 mm,其中2011年降水量去趋势距平值达到-2.1倍的标准差。

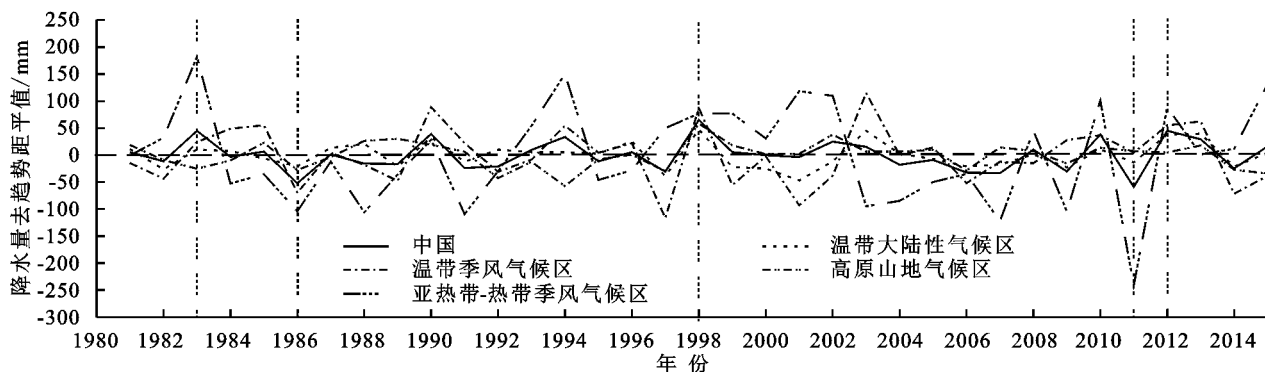


图1 1981—2015年中国区域降水量去趋势距平值

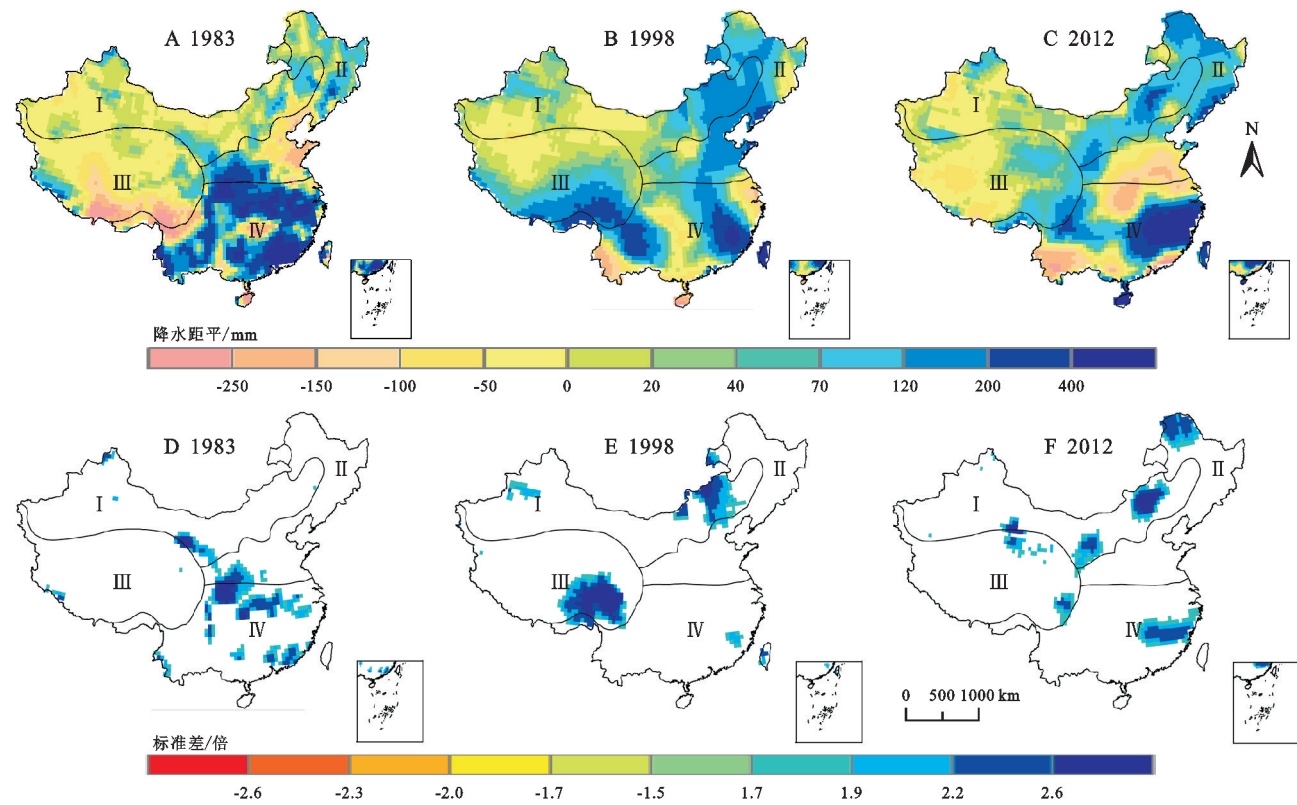
Fig. 1 Detrending anomaly values of regional precipitation in China from 1981 to 2015

1983年、1998年、2012年3个极端强降水年份降水量距平的空间分布具有明显的区域差异。与多年平均相比,1983年降水较多的区域主要发生在亚热带-热带季风气候区(Ⅳ),该气候区降水量较常年值偏高178 mm(14%),降水量距平值超过200 mm的区域占该气候区的46%(图2A),年降水量异常偏高区域主要出现在长江流域中下游,该年极端强降水

事件占极端强降水事件总数的5.1%(图2D)。1998年降水较多的区域主要发生在东南地区、金沙江流域、淮河流域、海河流域和辽河流域,高原山地气候区(Ⅲ)和温带大陆性气候区(Ⅰ)降水量的距平值分别为58, 47 mm,较常年值分别偏多19%, 28%(图2B)。极端强降水事件主要发生在金沙江流域和内蒙古东部,该年极端强降水事件占极端强降水事件总

数的 6.2%(图 2E),其中去趋势距平值超过标准差 2 倍以上的面积占高原山地气候区(Ⅲ)的 38%。2012 年降水较多的区域主要发生长江流域、内蒙古的东部和东北地区。亚热带-热带季风气候区(Ⅳ)降水量距

平值超过 200 mm 的区域占该气候区的 26%,温带大陆性气候区(Ⅰ)降水量较常年值偏高 40 mm (24%),该年极端强降水事件占极端强降水事件总数的 6.4%(图 2C,图 2F)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2016)1570 号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 2 中国区域极端强降水年份降水量距平(A,B,C)及对应极端强降水事件的空间分布(D,E,F)  
Fig. 2 Spatial distribution of precipitation anomalies (A, B, C) and corresponding extreme heavy rainfall events in China during extreme heavy rainfall years (D, E, F)

对于 1986 年、2011 年两个全国年降水量异常偏少年份,降水量较多年平均偏低的区域分别占全国的 82%,71%。1986 年温带大陆性气候区(Ⅰ)、温带季风气候区(Ⅱ)、高原山地气候区(Ⅲ)和亚热带-热带季风气候区(Ⅳ)降水量较常年值分别偏低 22 mm (−13%),62 mm (−11%),37 mm (−12%),107 mm (−8%)(图 3A),极端干旱事件主要分布在黄河

1981—2015 年极端干旱事件总数的 7.6%(图 3C)。与多年平均相比,2011 年降水偏少的区域主要发生在亚热带-热带季风气候区(Ⅳ),该气候区降水量的距平值为−238 mm,较常年值偏低 19%,降水量距平值小于−200 mm 的区域占该气候区的 66%(图 3B)。极端干旱事件主要发生在亚热带—热带季风气候区(Ⅳ),该年极端干旱事件占 1981—2015 年极端干旱事件总数的 8%(图 3D)。

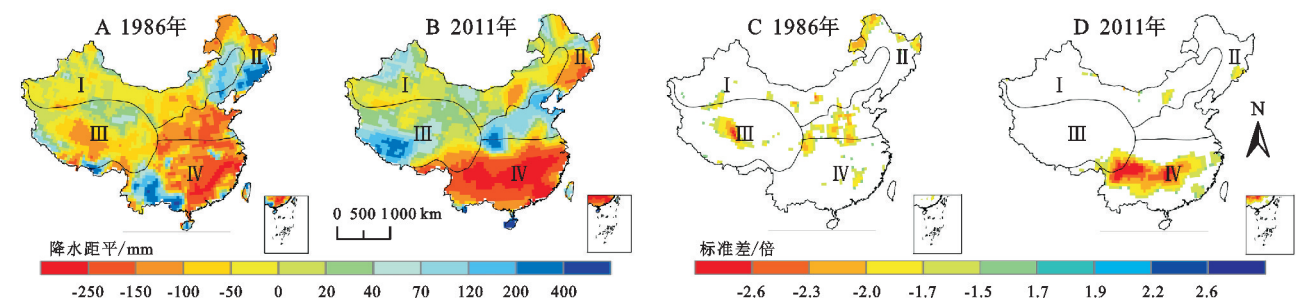


图 3 中国区域极端干旱年份降水量距平(A,B)及对应极端干旱事件的空间分布(C,D)  
Fig. 3 Spatial distribution of precipitation anomalies (A, B) and corresponding extreme drought events in extreme drought years in China (C, D)

基于极端降水事件的时空分布数据,按气候区分别统计 1981—1990 年、1991—2000 年和 2001—2015 年 3 个时段极端强降水和极端干旱事件出现的比例(图 4)。极端强降水事件出现比例最高的时段为 2001—2015 年(46%),1991—2000 年极端强降水事件出现比例最低(22%)。各个时段的极端强降水事件均主要发生在温带大陆性气候区,该气候区极端强降水事件降水量较常年值偏高 160 mm(图 4A)。极

端干旱事件出现比例最高的时段为 2001—2015 年(41%),主要发生在 2011 年,该时段极端干旱事件主要发生在亚热带-热带季风气候区,该气候区极端干旱事件降水量较常年值偏低 200 mm 以上的面积占比达 87%。1981—1990 年和 1991—2000 年极端干旱事件较为接近,分别为 30%,28%。1991—2000 年发生在高原山地气候区的极端干旱事件最多(10%),主要发生在 1992 年和 1994 年(图 4B)。

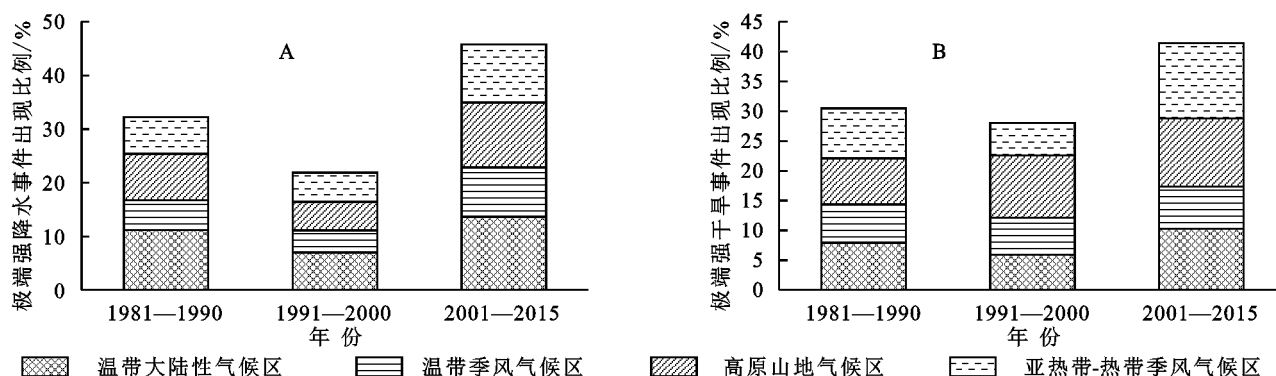


图 4 四大气候区极端强降水事件出现比例及极端干旱事件出现比例

Fig. 4 The proportion of extreme heavy precipitation events in the four major climate regions and the proportion of extreme drought events

## 2.2 极端气温事件时空分布特征

1981—2015 年中国年气温范围为 6.13~7.83℃,多年平均值为 7.06℃,总体上具有显著的上升趋势( $\text{slope} = 0.0272, p < 0.05$ )。图 5 为 1981—2015 年中国和四大气候区气温去趋势距平值的动态变化,四大气候区均

与全国具有显著的相关性。基于 1.5 倍标准差的极端值判别方法,全国极端高温年份发生在 1998 年,温度去趋势距平值为 0.73℃;全国极端低温年份发生在 2012 年,温度去趋势距平值为 -0.66℃。

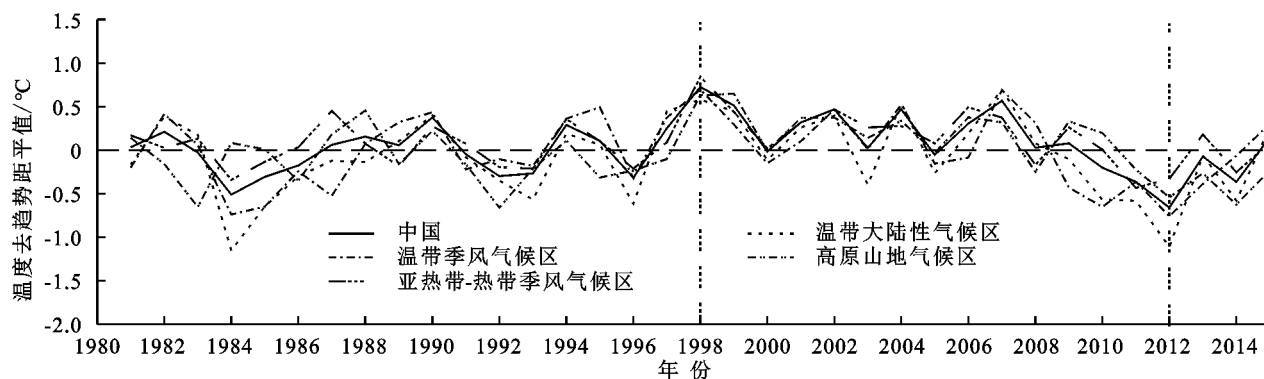


图 5 1981—2015 年中国区域温度去趋势值及四大气候区温度距平值

Fig. 5 Trend values of regional temperature in China from 1981 to 2015 and temperature anomalies in the four major climate regions

1998 年中国绝大部分地区气温较高,气温较多年平均偏高的区域占全国的 97%。温带大陆性气候区(I)、温带季风气候区(II)、高原山地气候区(III)和亚热带-热带季风气候区(IV)的温度较常年值分别偏高 0.66℃(9%),0.71℃(11%),0.64℃(49%),0.74℃(4%)(图 6A)。基于百分位阈值法,该年极端高温事件占 1981—2015 年极端高温事件总数的 26%,极端高温

事件主要分布在华南地区和西北地区的甘肃、青海及宁夏区域。特别是西南地区普遍达到了 2 倍标准差,去趋势距平值是标准差 2 倍以上的面积占亚热带-热带季风气候区(IV)的 27%(图 6B)。

2012 年为极端低温年,气温较多年平均偏低的区域占全国的 81%。其中温带大陆性气候区(I)、温带季风气候区(II)、高原山地气候区(III)和亚热



带-热带季风气候区(Ⅳ)的温度分别较常年值分别偏低 0.57℃(8%),0.43℃(7%),0.12℃(9%),0.14℃(1%)(图 7A)。该年极端低温事件占 1981—2015 年极端低温事件总数的 22%,极端低温事件主要分布

在温带大陆性气候区以及亚热带-热带气候区的贵州、湖南等地,特别是温带大陆性气候区普遍低于-1.5倍标准差,去趋势距平值是标准差-1.5 倍以下的面积占温带大陆性气候区的 64%(图 7B)。

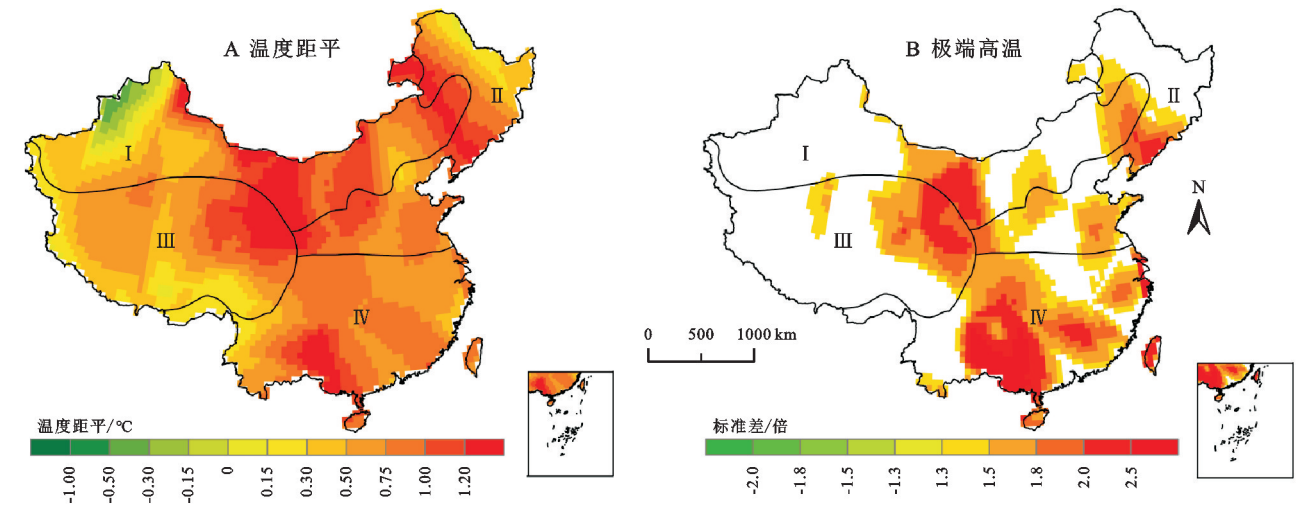


图 6 1998 年中国区域温度距平及极端高温事件的空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of regional temperature anomalies and extreme high temperature events in China in 1998

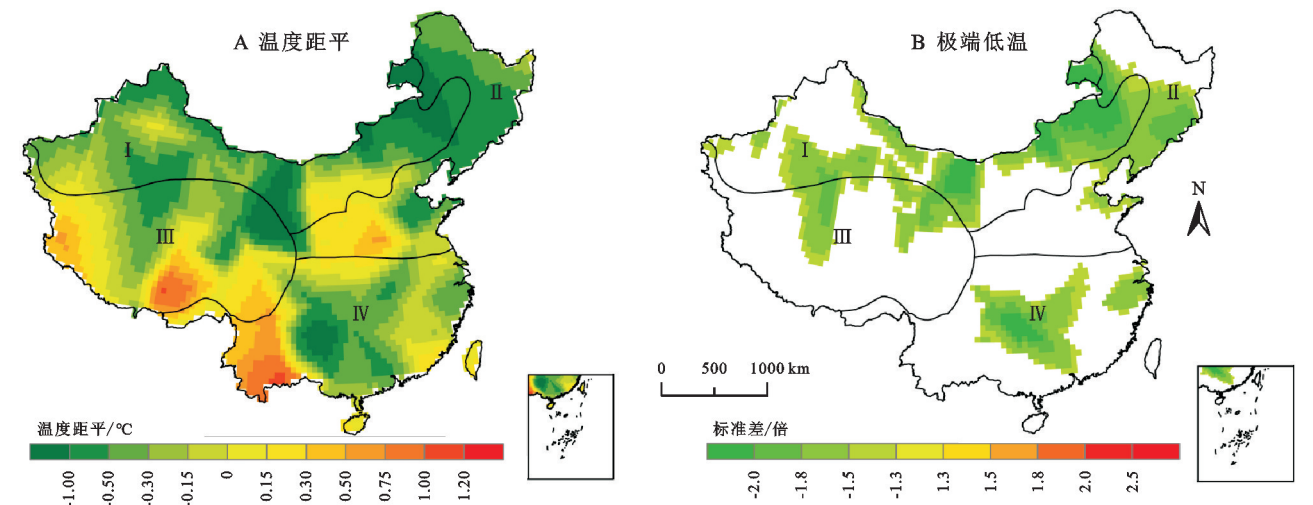


图 7 2012 年中国区域温度距平及极端低温事件的空间分布特征

Fig. 7 Spatial distribution characteristics of regional temperature anomalies and extreme low temperature events in China in 2012

基于极端气温事件的时空分布数据,按气候区分别统计 1981—1990 年、1991—2000 年和 2001—2015 年 3 个时段极端高温和极端低温事件出现的比例(图 8)。1991—2000 年和 2001—2015 年极端高温事件所占比例分别为 42%,43%,高于 1981—1990 年(15%),1991—2000 年极端高温事件主要发生在 1998 年、2001—2015 年极端高温事件主要发生在亚热带-热带季风气候区(12%),该气候区极端高温事件气温较常年值偏高 0.8℃(图 8A)。极端低温事件出现比例最高的时段为 2001—2015 年(53%),贡献最大的年份是

2012 年,该时段温带大陆性气候区极端低温事件占比高达 21%,气温较常年值偏低 0.6℃。1991—2000 年极端低温事件出现比例最低(14%),该时段发生在高原山地气候区的极端低温事件最多(9%),气温较常年值偏低 0.7℃(图 8B)。

2.3 复合极端气候事件时空分布特征

进一步统计 1981—1990 年、1991—2000 年和 2001—2015 年 3 个时段极端高温强降水、极端低温强降水、极端高温干旱和极端低温干旱 4 种复合极端气候事件出现的比例(图 9)。

结果表明,复合极端事件出现比例最高的时段为2001—2015年(55%),其中2012年贡献最大,该时段极端低温强降水事件占比达23%。1991—2000年复合极端气候事件出现比例为29%,其中极端高温

强降水事件占比达12%,贡献最大的年份是1998年。复合极端事件在1981—1990年这个时段出现比例最低(16%),其中极端低温强降水事件占比达9%,主要发生在1984年。

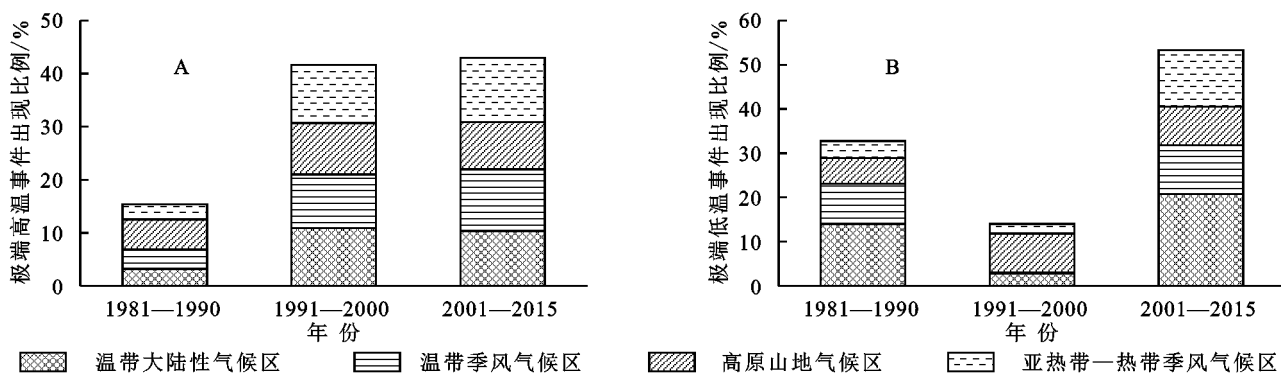


图8 四大气候区极端高温事件出现比例及极端低温事件出现比例

Fig. 8 The proportion of extreme high temperature events and the proportion of extreme low temperature events in the four major climate regions

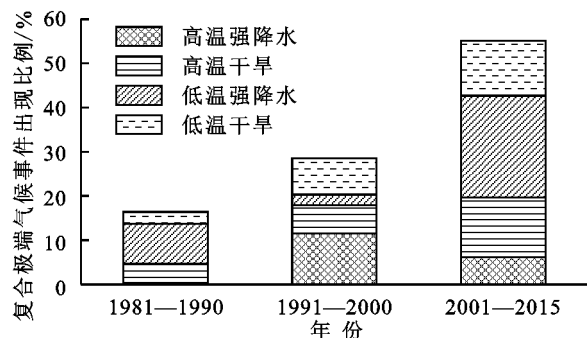


图9 复合极端气候事件出现比例

Fig. 9 Proportion of composite extreme climate events

1981—2015年复合极端气候事件的空间分布具有明显的区域差异。极端高温强降水事件频发于青海一带和京津冀地区,其中1998年贡献最大(40%),气温和降水去趋势距平值均超过标准差2倍以上的区域主要发生在青海一带,气温和降水分别较常年值

偏高0.3~0.8℃和72~156 mm(图10A)。极端高温干旱事件频发于松花江流域、内蒙古的东部、新疆的北部以及福建、江西一带,主要发生在2007年(51%),松花江流域和新疆的北部极端高温干旱事件强度最大,气温较常年值偏高0.2~0.7℃,降水量较常年值偏低62~174 mm(图10B)。极端低温强降水事件主要发生在温带大陆性气候区、辽宁地区、山东地区以及广西地区,极端低温强降水事件强度最大的地区主要位于内蒙古的东部和山东地区,气温较常年值偏低0.4~1.6℃,降水量较常年值偏高106~324 mm(图10C)。高原山地气候区以及华南地区发生极端低温干旱事件的频率最大,其中1992年(30%)和2011年(28%)是两个高发年份,气温和降水去趋势距平值均低于标准差-2倍以下的区域主要发生在西藏的东部和广西广东的北部(图10D)。

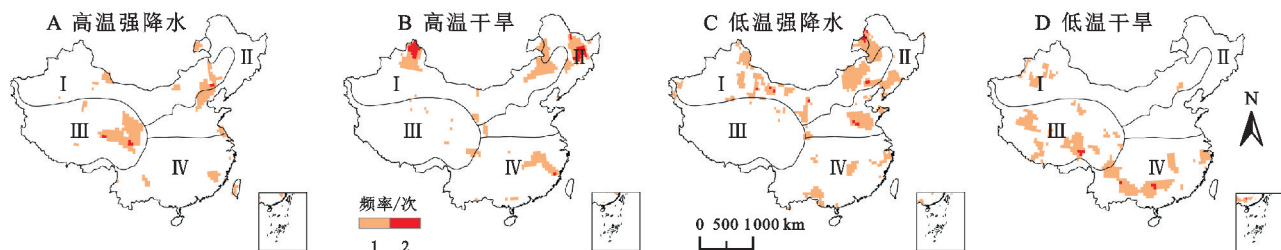


图10 1981—2015年复合极端气候事件发生频率的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of the frequency of composite extreme climate events from 1981 to 2015

### 3 讨论

极端气候事件的时空分布差异主要受影响我国的多个气候系统异常变化的共同作用。随着全球气候变暖,东亚夏季风环流的急剧增强和大气层结波动

性的增大为我国极端降水事件的增加创造了有利条件<sup>[26]</sup>。其中,1998年我国长江流域出现的罕见强降水主要受副热带高压、南海季风涌、中高纬冷空气等方面的共同影响<sup>[1]</sup>。而1983年和2012年长江中下游地区出现持续性致洪暴雨,则主要受西太平洋副热



带高压、中高纬度南侵的冷空气以及青藏高原东移的中尺度系统协同作用,导致梅雨锋持续维持在长江流域<sup>[27]</sup>。2011年受拉尼娜事件影响,赤道西太平洋海温急剧升高,使得我国亚热带-热带季风气候区降水量异常偏低,导致长江中下游地区干旱<sup>[28]</sup>。受东亚季风、印度季风、高原季风和西风带的影响导致1986年青藏高原地区降水量偏低<sup>[29]</sup>。20世纪80—90年代中国大部分区域的降水呈现不同程度的降低,中国北部地区最为显著,温带大陆性气候区极端强降水发生频率显著减少,这与Zhai等<sup>[8]</sup>研究的极端降水空间格局较为一致。高原山地气候区地处亚洲西风核心区,常年受到北半球强烈的西风环流影响,其中1991—2000年高原山地气候区降水量较不稳定,干旱发生频率较高,干旱异常在空间上表现为较高的一致性<sup>[30]</sup>。

在我国的南方地区,随着亚热带高压在夏季逐渐增强,致使极端高温事件发生频率上升,而西南季风在冬季增强,阻碍了西北西伯利亚高压南移,致使极端低温事件发生频率降低<sup>[31]</sup>。北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)和厄尔尼诺-南方涛动指数(ENSO)等大气环流指数对我国不同地区的极端气温有着不同的影响特性<sup>[32]</sup>,如AO是负相位时我国北方地区发生极端低温天气的频率更大<sup>[33]</sup>。2012年东亚冬季风异常偏强造成我国气温大范围异常偏低<sup>[34]</sup>,1998年高原地表温度异常偏高和1992年高原地表温度异常偏低都与对流层顶气压异常密切相关<sup>[35]</sup>。20世纪80—90年代我国极端高温事件表现出显著上升趋势,极端低温事件表现出显著下降趋势,这与张大任等<sup>[36]</sup>研究的极端气温事件年代际变化特征较为一致。90年代以来,中国极端高温事件表现出频次增多、范围变大、持续时间变长等特征,尤其是人口密集的南方地区,西太平洋副热带高压是影响中国南方高温的重要因素<sup>[37]</sup>。1981—1990年和2001—2015年温带大陆性气候区极端低温事件发生频率较高,主要原因是冬季AO指数与温带大陆性气候区的冷日天数和冷夜天数具有显著的负相关关系<sup>[38]</sup>。

此外,陆气反馈作用会导致中国东部地区极端高温事件的发生,这在很大程度上提高了该地区极端高温干旱事件的发生风险<sup>[39]</sup>。高原山地气候区降水与气温具有显著的正相关关系<sup>[40]</sup>,这在一定程度上解释了该地区极端高温干旱事件发生频率较低的原因。近几十年来我国极端高温强降水事件频发于青海一带,极端低温干旱事件主要发生在高原山地气候区以

及华南地区<sup>[41]</sup>,这与本文所研究的复合极端气候事件的空间格局较为一致。

可以看出,东亚季风、副热带高压等系统的协同变化在很大程度上影响着我国极端气候事件的发生区域和强度。对这些系统变化的预测水平决定了对未来极端气候事件的预测能力。全球气候模式是预估气候系统未来变化的主要工具,CMIP6相较于CMIP5具有更高的分辨率,使其在区域平均的极端降水上较CMIP5有明显改进,提高模式分辨率后的CMIP6对于干旱、半干旱区区域平均的极端降水的模拟能力更强,但对东亚季风的模拟还存在较大偏差<sup>[42]</sup>。以深度学习为代表的机器学习算法在气象领域的应用可能为提升未来极端气候事件预测能力提供新的途径<sup>[43]</sup>。

本研究采用的连续时空极端事件分析方法能够对连续时空范围内极端气候事件高发区域和时段的定量研究,能较好地支撑极端气候事件对生态系统状态变化方面研究。由于极端气候事件对生态系统过程的影响程度与事件的发生时间存在密切联系<sup>[12]</sup>,今后还需进一步分析中国区域日、月等短时间尺度上极端气候事件的时空分布特征,为量化中国区域不同类型的极端气候事件对中国生态系统变化的季节贡献及事件的持续影响和“遗产”效应提供支撑。

## 4 结论

不同极端气候事件发生的年份不同,极端强降水年发生在1983年、1998年和2012年,极端干旱年发生在1986年和2011年,极端高温年和极端低温年分别发生在1998年和2012年,不同极端气候事件具有明显的区域差异性。1981—2015年期间,46%的极端强降水事件发生在2001—2015年,尤其集中在温带大陆性气候区;13%的极端干旱事件发生在2001—2015年的亚热带-热带季风气候区;极端高温事件频发于1991—2000年和2001—2015年;21%的极端低温事件发生在2001—2015年的温带大陆性气候区。复合极端气候事件出现比例存在逐年代际递增的趋势,1981—1990年和2001—2015年占比最高的复合极端事件均为极端低温强降水事件。本研究采用连续时空极端事件分析方法能够较好地对中国区域连续时空范围内极端气候事件高发区域和时段进行定量研究,增强了对我国极端气候事件发生规律的认知,未来还需进一步加强分析中国区域日、月等短时间尺度上极端气候事件的时空分布特征。

## 参考文献:

- [1] 张顺利,陶诗言,张庆云,等.1998年夏季中国暴雨洪涝灾害的气象水文特征[J].应用气象学报,2001,12(4):442-457.  
Zhang S L, Tao S Y, Zhang Q Y, et al. Meteorological and hydrological characteristics of heavy rainstorm flood disasters in China in the summer of 1998[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2001,12(4):442-457.
- [2] Stone R. Ecologists report huge storm losses in China's forests[J]. Science, 2008,319:1318-1319.
- [3] Zhu B L, Xue L Q, Wei G H, et al. CMIP5 projected changes in temperature and precipitation in arid and humid basins[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019,136:1133-1144.
- [4] Xu Y, Xu C H. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012,5(6):489-494.
- [5] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)[R]. New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [6] 管玥,何奇瑾,刘佳鸿,等.黄淮海地区1961—2015年极端气温及其初终日序的变化特征[J].水土保持研究, 2021,28(1):147-152.  
Guan Y, He Q J, Liu J H, et al. Variation characteristics of extreme temperature and its earliest and latest day sequence in Huang-Huai-Hai region during the period 1961 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(1):147-152.
- [7] 慎璐璐,杨艳芬,吴晶,等.黄河流域极端气候事件时空变化规律[J].水土保持研究,2022,29(2):231-242.  
Shen L L, Yang Y F, Wu J, et al. Spatial and temporal variation characteristics of extreme climate events in the yellow river basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(2):231-242.
- [8] Zhai P, Zhang X, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. Journal of Climate, 2005,18(7):1096-1108.
- [9] 葛非凡,毛克彪,蒋跃林,等.华东地区夏季极端高温特征及其对植被的影响[J].中国农业气象,2017,38(1):43-51.  
Ge F F, Mao K B, Jiang Y L, et al. Extreme high-temperature in summer and its impacts on vegetation in East China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017,38(1):43-51.
- [10] 罗玉.西南地区极端降水和气温的变化特征及其与高原夏季风的关系研究[D].成都:成都信息工程大学,2015.  
Luo Y. Characteristics of Extreme Precipitation and Temperature Change in Southwest China and Their Relationship with Summer Winds in the Plateau[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Science and Technology, 2015.
- [11] 江志红,陈威霖,宋洁,等.7个IPCC AR4模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估[J].大气科学,2009,33(1):109-120.  
Jiang Z H, Chen W L, Song J, et al. Assessment of the ability of the 7 IPCC AR4 models to simulate extreme precipitation indices in China and their future scenario projections[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009,33(1):109-120.
- [12] 朴世龙,张新平,陈安平,等.极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响[J].中国科学:地球科学,2019,49(9):1321-1334.  
Piao S L, Zhang X P, Chen A P, et al. Effects of extreme weather events on the carbon cycle of terrestrial ecosystems[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2019,49(9):1321-1334.
- [13] Schwalm C R, Williams C A, Schaefer K, et al. Reduction in carbon uptake during turn of the century drought in western North America[J]. Nature Geosciences, 2012,5:551-556.
- [14] Ge J, Xiong G, Wang Z, et al. Altered dynamics of broad-leaved tree species in a Chinese subtropical montane mixed forest: The role of an anomalous extreme 2008 ice storm episode[J]. Ecology and Evolution, 2015,5(7):1484-1493.
- [15] Richardson A D, Hollinger D Y, Aber J D, et al. Environmental variation is directly responsible for short-but not long-term variation in forest-atmosphere carbon exchange[J]. Global Change Biology, 2007,13(4):788-803.
- [16] Song Y, Achberger C, Linderholm H W. Rain-season trends in precipitation and their effect in different climate regions of China during 1961—2008[J]. Environmental Research Letters, 2011,6(3):034025.
- [17] Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations the CRU TS3.10 Dataset[J]. International Journal of Climatology, 2014,34(3):623-642.
- [18] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996,77(3):437-472.

- [19] Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. The NCEP climate forecast system version 2 [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(6): 2185-2208.
- [20] 袁源, 赖欣, 巩远发, 等. CLM4.5 模式对青藏高原土壤湿度的数值模拟及评估[J]. *大气科学*, 2019, 43(3): 676-690.  
Yuan Y, Lai X, Gong Y F, et al. CLM4.5 model simulation of soil moisture over the Qinghai-Xizang plateau and its performance evaluation[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, 43(3): 676-690.
- [21] He J, Yang K, Tang W L, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1). DOI:10.1038/s41597-020-0369-y.
- [22] Cuo L, Zhang Y X, Gao Y H, et al. The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China[J]. *Journal of Hydrol*, 2013, 502(2): 37-52.
- [23] Zscheischler J, Mahecha M, Harmeling S, et al. Detection and attribution of large spatiotemporal extreme events in Earth observation data[J]. *Ecological Informatics*, 2013, 15: 66-73.
- [24] Zscheischler J, Reichstein M, Buttler J, et al. Carbon cycle extremes during the 21st century in CMIP5 models: Future evolution and attribution to climatic drivers[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41: 8853-8861.
- [25] Chen W Z, Zhu D, Huang C J, et al. Negative extreme events in gross primary productivity and their drivers in China during the past three decades[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 275: 47-58.
- [26] 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系[J]. *大气科学*, 2006, 30(5): 730-743.  
Huang R H, Cai R S, Chen J L, et al. The chronologic changes of drought and flood climate disasters in China and their relationship with the changes in the climate system in East Asia[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(5): 730-743.
- [27] 郭广芬, 杜良敏, 肖莺, 等. 长江流域夏季极端降水时空分布特征[J]. *干旱气象*, 2021, 39(2): 235-243.  
Guo G F, Du L M, Xiao Y, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of extreme precipitation in summer in the Yangtze River Basin[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2021, 39(2): 235-243.
- [28] 吕星玥, 荣艳淑, 石丹丹. 长江中下游地区 2010/2011 年秋冬春连旱成因再分析[J]. *干旱气象*, 2019, 37(2): 198-208.  
Lü X Y, Rong Y J, Shi D D. Re-analysis of the causes of drought in the middle and lower reaches of the Yangtze River in the autumn, winter and spring of 2010/2011[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2019, 37(2): 198-208.
- [29] 李晓英, 姚正毅, 肖建华, 等. 1961—2010 年青藏高原降水时空变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1233-1240.  
Li X Y, Yao Z Y, Xiao J H, et al. Spatial-temporal variation characteristics of precipitation on the Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2010[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(5): 1233-1240.
- [30] 王婉昭, 高艳红, 许建伟. 青藏高原及其周边干旱区气候变化特征与 GLDAS 适用性分析[J]. *高原气象*, 2013, 32(3): 635-645.  
Wang W Z, Gao Y H, Xu J W, et al. Climate change characteristics and GLDAS applicability analysis of the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding arid areas[J]. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(3): 635-645.
- [31] 关颖慧. 长江流域极端气候变化及其未来趋势预测[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.  
Guan Y H. Changes in Extreme Climate Events and Future Prediction in the Yangzi River[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.
- [32] 朱圣男, 刘卫林, 万一帆, 等. 抚河流域干旱时空分布特征及其与 ENSO 的相关性[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6): 131-138.  
Zhu S N, Liu W L, Wan Y F, et al. The spatiotemporal distribution characteristics of drought in the Fuhe River Basin and its correlation with ENSO[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6): 131-138.
- [33] 据建华, 任菊章, 吕俊梅. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响[J]. *高原气象*, 2004, 23(4): 429-434.  
Ju J H, Ren J Z, Lv J M. Effects of interdecadal changes in Arctic oscillations on winter warming in northern East Asia[J]. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(4): 429-434.
- [34] 孙丞虎, 任福民, 周兵, 等. 2011/2012 年冬季我国异常低温特征及可能成因分析[J]. *气象*, 2012, 38(7): 884-889.  
Sun C H, Ren F M, Zhou B, et al. Analysis of abnormal low temperature characteristics and possible causes in China in the winter of 2011/2012[J]. *Meteorological Monthly*, 2012, 38(7): 884-889.
- [35] 朱保林, 管兆勇, 卢楚翰, 等. 夏季北半球青藏高原对流层顶气压异常变动的物理机制研究[J]. *高原气象*, 2011, 30(3): 559-567.  
Zhu B L, Guan Z Y, Lu C H, et al. Study on the



- physical mechanism of abnormal changes in tropospheric top pressure on the Qinghai-Tibet Plateau in the northern hemisphere in summer[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(3): 559-567.
- [36] 张大任, 郑静, 范军亮, 等. 近 60 年中国不同气候区极端温度事件的时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2019, 40(7): 422-434.
- Zhang D R, Zheng J, Fan J L, et al. Spatio-temporal variation characteristics of extreme temperature events in different climatic zones in China in the past 60 years [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(7): 422-434.
- [37] 杨涵洧, 封国林. 2013 年盛夏中国持续性高温事件诊断分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 484-494.
- Yang H Y, Feng G L. Diagnostic analysis of persistent high temperature events in China in the middle of the summer of 2013 [J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(2): 484-494.
- [38] 丁园圆, 缪启龙, 王勇. 中国北方冬季极端温度的变化及其与 AO 相关分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(5): 95-101.
- Ding Y Y, Liao Q L, Wang Y. Variation of winter extreme temperatures in northern China and their correlation with AO [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(5): 95-101.
- [39] Zhang J Y, Wu L Y. Land-atmosphere coupling amplifies hot extremes over China [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(31): 3328-3332.
- [40] He B, Wang H L, Wang Q F, et al. A quantitative assessment of the relationship between precipitation deficits and air temperature variations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(12): 5951-5961.
- [41] 肖秀程, 黄丹青, 严佩文. 极端气温和极端降水复合事件的气候特征[J]. 气象科学, 2020, 40(6): 744-751.
- Xiao X C, Huang D Q, Yan P W. Climatic characteristics of complex events of extreme temperatures and extreme precipitation [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(6): 744-751.
- [42] Zhou T J, Zhang W X, Zhang L X, et al. The dynamic and thermodynamic processes dominating the reduction of global land monsoon precipitation driven by anthropogenic aerosols emission [J]. Science China Earth Sciences, 2020, 63: 919-933.
- [43] 陈训来, 刘军, 郑群峰, 等. 基于卷积门控循环单元神经网络的临近预报方法研究[J]. 高原气象, 2021, 40(2): 411-423.
- Chen X L, Liu J, Zhen Q F, et al. Research on proximity prediction method based on convolutional gated recurrent unit neural network [J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(2): 411-423.

(上接第 294 页)

- [23] 蒋富强, 石龙, 李凯崇. 兰新二线挡风墙下部开口疏导线路积沙试验[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(7): 13-17.
- Jiang F Q, Shi L, Li K C. Experiment of clearing route eolian-sand by opening at the bottom of windbreak along Lanzhou-Xinjiang railway second line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(7): 13-17.
- [24] 刘贤万, 凌裕泉, 贺大良, 等. 下导风工程的风洞试验研究: [1] 平面上的试验[J]. 中国沙漠, 1982, 2(4): 18-25.
- Liu X W, Ling Y Q, He D L, et al. Studies on the effects of fence in wind tunnel: Part 1. experiment with level surface [J]. Journal of Desert Research, 1982, 2(4): 14-21.
- [25] 张超, 韩彦隆, 高永, 等. 导风板倾角对板后风沙流输沙的影响[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 520-527.
- Zhang C, Han Y L, Gao Y, et al. Effect of dip angles of wind guide plate on sediment discharge behind the plate [J]. Journal of Arid Zone Research, 2019, 36(2): 520-527.