

DOI: 10.5846/stxb202108172265

赵梦凡, 赵彤, 颜亮东, 李英年, 温婷婷, 祁栋林, 苏文将. 三江源区近 60 年不同气候态极端气温事件时空分布特征. 生态学报, 2022, 42(14): 5616-5629.

Zhao M F, Zhao T, Yan L D, Li Y N, Wen T T, Qi D L, Su W J. Temporal and spatial characteristics of extreme temperature events over the Three-river Source Region in different climate states during 1961—2020. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5616-5629.

三江源区近 60 年不同气候态极端气温事件时空分布特征

赵梦凡^{1,2}, 赵彤^{1,2}, 颜亮东^{1,2,*}, 李英年³, 温婷婷⁴, 祁栋林^{1,2}, 苏文将^{1,2}

1 青海省气象科学研究所, 西宁 810001

2 青海省防灾减灾重点实验室, 西宁 810001

3 中科院西北高原生物研究所/青海省寒区恢复生态学重点实验室, 西宁 810008

4 青海省气候中心, 西宁 810001

摘要: 利用 1961—2020 年三江源区 23 个国家气象站点的逐日最高温度和最低温度资料, 通过划分 1961—1990 年、1971—2000 年、1981—2010 年和 1991—2020 年 4 个气候态(分别记做第 I、II、III、IV 气候态), 分析不同气候态中极端高温和极端低温事件的阈值、频次和强度的时空分布特征并探索其变化原因。空间分布上, 极端温度阈值基本表现为海拔越高阈值越低且东西向逐渐降低, 不同气候态存在一定的非对称性增温的特征。极端高温频次和强度的空间分布区域性和规律性均优于极端低温, 表现为第 I、II 气候态自西向东递减, 第 III、IV 气候态自西向东递增的径向空间分布特征; 时间变化上, 极端高温频次和强度均呈现弱增加—迅速增加—增速放缓的整体增加趋势, 而极端低温不同气候态中频次和强度时间变化趋势特征并非全部一致, 表现为频次显著增加—极端性降低—频次增加—极端性增加—频次显著减少—极端性显著降低, 极端性的下降与三江源区生态保护政策的实施保持一致。进一步归因分析后发现, 极端气温与多个环流系统遥相关且存在较好的因果关系, 国省碳排放也对极端气温时间序列变化有较好的滞后响应。

关键词: 极端温度; 气候态; 三江源; 变化特征

Temporal and spatial characteristics of extreme temperature events over the Three-river Source Region in different climate states during 1961—2020

ZHAO Mengfan^{1,2}, ZHAO Tong^{1,2}, YAN Liangdong^{1,2,*}, LI Yingnian³, WEN Tingting⁴, QI Donglin^{1,2}, SU Wenjiang^{1,2}

1 Qinghai Academy of Meteorological Sciences, Xining 810001, China

2 Key Laboratory for Disaster Prevention and Mitigation in Qinghai, Xining 810001, China

3 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science/Key Laboratory of Restoration Ecology of Cold Area in Qinghai Province, Xining 810008, China

4 Qinghai Climate Centre, Xining 810001, China

Abstract: The Tibet Plateau is the "driver" and "amplifier" reflecting the climate change and also known as the "The world's third pole". As an important part of the Tibet Plateau, the Three-river Source Region plays an important role in water conservation, climate regulation and ecological security. It is found that the high temperature phenomenon in Qinghai will become more frequent in the 21st century, and the warming rate will be greater than 0.30°C/10a. The increase of temperature will not only directly affect the change of extreme temperature, but also cause extreme climatic events such as high temperature, drought, rainstorm and flood, thus affecting the natural ecological environment and social economic

基金项目: 中国科学院 青海省人民政府 三江源国家公园联合专项(LHZX-2020-07); 第二次青藏高原科考项目(2019QZKK0105); 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室开放基金项目(CAMF-201904)

收稿日期: 2021-08-17; 网络出版日期: 2022-03-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 314844226@qq.com

activities. At present, studies on climate change in the Three-river Source Region mainly focus on the days of extreme climate events and the analysis of climate abrupt change, but there are few studies about the changes in frequency and intensity of extreme temperature events of different baseline climate states. Using the daily maximum and minimum temperature data of 23 national meteorological stations in the Three-river Source Region from 1961 to 2020, four climatic states were divided, including I (1961—1990), II (1971—2000), III (1981—2010) and IV (1991—2020). We analyzed the spatial and temporal distribution characteristics of threshold, frequency and intensity of extreme high temperature and extreme low temperature events in different climate states and explored the reasons for their changes. In terms of spatial distribution, the extreme temperature threshold basically shows that the higher the altitude, the lower the threshold, and gradually decreases from east to west. There are certain asymmetric warming characteristics in different climate states. The spatial distribution of the frequency and intensity of extreme high temperature is better than that of extreme low temperature, which shows the radially spatial distribution characteristics of the first and second climate states decreasing from west to east and the third and fourth climate states increasing from west to east; In terms of time variation, the frequency and intensity of extreme high temperature show an overall increasing trend of weak increase-rapid increase-slowdown of growth. However, the characteristics of time variation trend of frequency and intensity of extreme low temperature in different climatic states are not all consistent, which is manifested in significant increase in frequency, decrease in extreme-increase in frequency, increase in extreme-significant decrease in frequency and decrease in extreme. The decline of extremes is consistent with the implementation of ecological protection policies in the Three-river Source Region. After further analysis, it is found that the extreme temperature is teleconnected with multiple circulation systems, and there is a good causal relationship. The carbon emission of country also has a good lag response to the time series change of extreme temperature.

Key Words: extreme temperature; climate states; the Three-river Source Region; variation characteristics

青藏高原被称为“世界第三极”,是我国及东亚气候系统稳定的重要屏障,不仅直接影响着我国天气、气候的形成和演变,而且对东亚甚至北半球的大气环流都有着极其重要的影响,是反映全球变化敏感性的“驱动力”和“放大器”^[1-4]。三江源地区作为青藏高原的重要组成部分,在水源涵养、气候调节、生态安全等方面具有重要的战略地位^[5-6]。

气候变化不仅仅关乎生态,更是成为一个涉及包括国家安全、国际关系、社会经济与环境等多个领域的发展与政治的综合问题,在全球气候变暖背景下,极端气象事件呈现多发、频发的态势^[7-8],就青海而言,《西北区域气候变化评估报告》^[9]认为 21 世纪本区域高温现象更加频繁,升温速率将大于 0.30℃/10a,气温升高不仅直接影响温度极值的变化,而且会诱发高温干旱、暴雨洪涝等极端气候事件频繁发生,进而影响自然生态环境和社会经济活动^[10]。全球气候变化虽然表现出较为一致的趋势,但是仍存在明显的区域差异:美国和前苏联极端最低温度在过去几十年上升趋势较为显著,极端最高温度则表现出一定的区域性^[11];欧亚大陆随着北极地区持续增温出现降温趋势,冷冬更加频繁^[12];澳大利亚极端最高气温在 21 世纪预计将增加 3.5℃^[13];伊拉克在过去 60 年气温增长速度达到全球气温上升速度的 2 到 7 倍,其中极端暖夜天数增加显著^[14]。我国气象工作者在关于青藏高原极端温度事件的研究方面也取得了一定的研究成果,冯晓莉等^[15]指出近 58 年来,青海高原极端气温温暖指数显著增加,极端气温冷指数显著减少,陈锐杰^[16]研究发现青藏高原极端高温事件频率与强度呈增加趋势,极端低温事件频率与强度呈减弱趋势。

目前针对三江源区气候变化的研究主要围绕极端气候事件日数变化和气候突变分析^[17-18],研究年代较远且关于不同基准气候态极端气温事件频次、强度变化以及正态分布下的极端小概率频次等方面的分析相对较少。本研究通过划分四个基准气候态(1961—1990 年、1971—2000 年、1981—2010 年、1991—2020 年),基于不同气候态和整体气候趋势中极端气温事件频次和强度的时间变化趋势和空间分布特征,揭示三江源区极端气温事件变化事实和发展趋势,探讨全球变暖背景下三江源地区气候是否更加趋于极端化、极端气温事件是否更加频繁等问题,对提升灾害性天气气候事件的预测能力,指导政府制定可持续发展战略、强化气象防灾减灾和应对气候变化能力具有十分重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域位于青藏高原腹地、青海省南部的三江源地区(31°39′—36°16′N, 89°24′—102°23′E), 是长江、黄河、澜沧江的发源地, 全区总面积 31.2 万 km², 其中长江源区面积 14.0 万 km², 黄河源区面积 11.8 万 km², 澜沧江源区面积 5.4 万 km², 行政区域涉及玉树、果洛、海南、黄南 4 个西藏自治区的 16 个县和格尔木市的唐古拉乡, 海拔 3450—6621m, 地形由西向东逐渐降低(图 1)。三江源区属于典型的高原大陆性气候, 特征表现为冬寒夏凉、暖季短暂、冷季漫长, 年温差小、日温差大, 日照时间长、辐射强烈, 雨量偏少、雨热同期, 干湿季分明, 年均气温在 -5.6—3.8℃ 之间, 年均降水量在 262.2—772.8mm 之间^[6,19]。

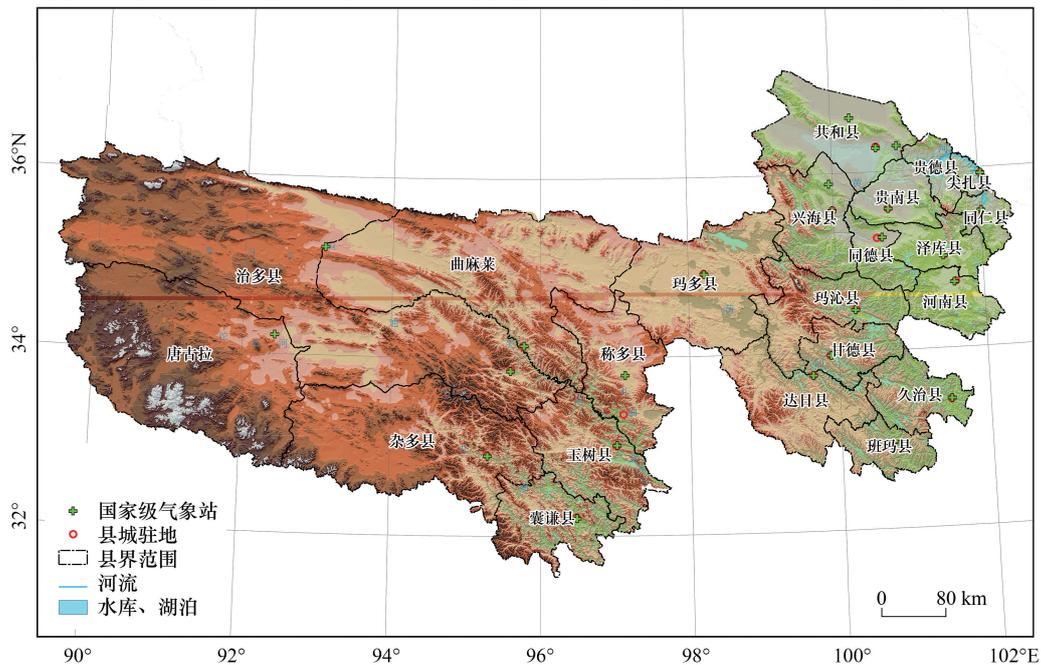


图 1 研究区域基本地理信息示意图

Fig.1 Basic geographic information in the study area

1.2 数据来源

气象数据选用三江源区 23 个国家气象站 1961—2020 年逐日最高温度、最低温度等, 对气象数据进行严格质量控制, 剔除异常数据, 对缺失数据采用滑动平均插值法等方式进行补充。

归因分析使用的国省区域年尺度碳排放数据和北半球月尺度大气环流指数数据分别通过中国碳核算数据库(<https://www.ceads.net.cn>) 和国家气候中心气候系统(<https://cmdp.ncc-cma.net/cn/index.htm>) 获得。

1.3 研究方法

1.3.1 基准气候态划分

“基准气候态”是将某一气候相对稳定的时期作为“基准气候时期”, 根据世界气象组织的定义, 某气象要素 30 年的平均值可作为气候基准值, 基准气候态具有更长的时间序列和可靠的气候信息, 能够很好地代替真实气候值, 是目前气候领域中分析气候和气候变化研究常用的方法之一^[20—21]。本文定义 1961—1990 年、1971—2000 年、1981—2010、1991—2020 年为第一、第二、第三、第四基准气候态, 记为第 I、II、III、IV 气候态, 基于不同气候态对三江源区极端高温、极端低温事件时空变化特征进行研究。

1.3.2 极端气温事件指标

极端气象指标的定义和计算同样采用世界气象组织定义的极端气温指数, 通过非参数百分法确定极端气

温事件的阈值^[22]。具体定义见表 1。

表 1 极端气温事件指标定义

Table 1 Definition of extreme temperature event index

指数代码 Index codes	名称 Names	定义 Definition	单位 Unit
TN10	极端低温日数	日最低气温小于第 10 个百分位数值的天数	d
TX90	极端高温日数	日最高气温大于第 90 个百分位数值的天数	d

1.3.3 趋势系数

为了较为直观的了解三江源区极端温度事件在时间尺度上的长期趋势变化,本研究采用趋势系数来表征极端温度和时间的密切程度,并对计算得到的趋势系数进行了显著性水平检验。由于趋势系数是一个无量纲量,在 $[-1, 1]$ 之间来回波动,从而有效地消去了气象要素的均方差对线性回归系数大小的影响^[23]。

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \quad (1)$$

式中, r_{xt} 为极端温度趋势系数, n 为年数, x_i 是第 i 年的气象要素值, \bar{x} 为样本均值, $\bar{t} = \frac{n+1}{2}$ 。

1.3.4 概率密度

随机变量 x 的概率密度函数为:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

式中, μ 是均值, σ^2 为方差。图 2 为基于概率密度和正态分布切割线的班玛日最高气温正态分布情况,介于 $\mu \pm 3\sigma$ 的面积占比为 99.73%, $\mu \pm 2\sigma$ 的面积占比为 95.45%, $\mu \pm \sigma$ 的面积占比为 68.27%。

偏度和峰度分别用来衡量随机变量概率密度分布曲线的对称性和平坦度:

$$S = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^2} \quad (4)$$

式中, S 表示偏度(无量纲); K 表示峰度(无量纲); i 表示第 i 个数值; \bar{x} 表示随机变量平均值; n 表示采样数量。

1.3.5 经验正交函数分析方法

经验正交函数分析方法(empirical orthogonal function, EOF)可用于描述特征向量场的主要分型和年际变化^[24]。本文通过 NCL 编程并进行数据处理,分析不同气候态中极端高温、极端低温事件的发生频次、强度的时间特征向量的演变规律,并采用 North 检验判断计算结果显著性。

1.3.6 格兰杰因果关系检验

格兰杰因果关系检验是一种可以有效规避变量间伪相关的统计方法,一开始应用于经济学领域,而后被引入气象学和生态学,该检验法可判别两个时间序列之间有无因果相关关系及对应因果关系方向,当解释变量和被解释变量在时间序列上通过平稳性检验和协整检验后,可进一步用于三江源区极端气温归因分析研究^[25-27]。

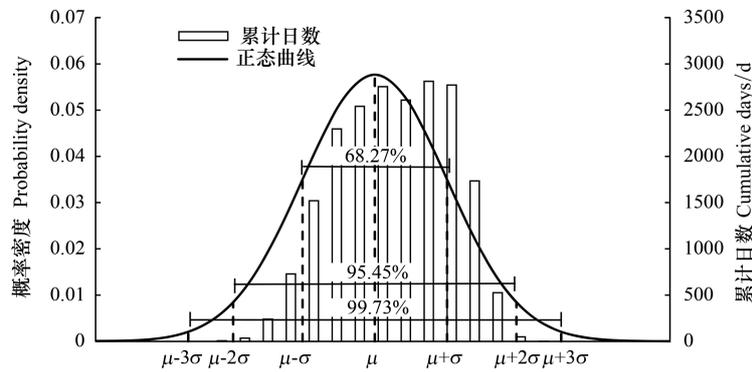


图2 正态分布的期望值(μ)和标准差(σ) (以班玛日最高气温为例)

Fig.2 Expectation (μ) and standard deviation (σ) of normal distribution of daily maximum temperature in Banma

2 结果与分析

2.1 不同气候态下极端气温阈值的空间分布

图3为三江源区第I气候态极端高温和极端低温阈值的空间分布,受海拔地形影响,经向分布特征明显,第II、III、IV气候态极端气温阈值空间分布特征与第I气候态相似,大致呈现自西向东的递增趋势,且夏冬季节分布特征相似。受70年代和90年代最低温转折点影响^[28],第II气候态冬季极端气温阈值下限下降0.28℃,结合图4可以看出,在全球增温大背景下,三江源区冬季极端低温阈值较夏季极端高温阈值相比上升更快,增幅更大。

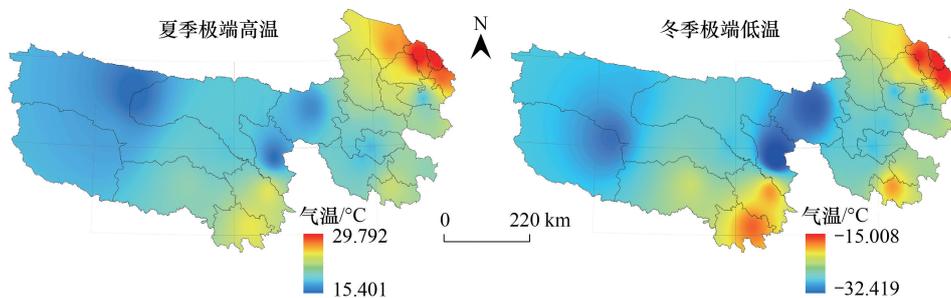


图3 第I气候态夏季和冬季极端气温阈值

Fig.3 Extreme temperature threshold of the first climate state in summer and winter

表2 三江源区不同气候态极端气温阈值/℃

Table 2 Extreme temperature thresholds of different climate states in the Three-river Source Region

气候态 Climate states	极端高温上限 Upper limit of extreme high temperature	极端高温下限 Lower limit of extreme high temperature	差值 Differences	极端低温上限 Upper limit of extreme low temperature	极端低温下限 Lower limit of extreme low temperature	差值 Differences
I	29.80	15.40	14.40	-15.00	-32.42	17.42
II	30.19	15.80	14.39	-14.50	-32.70	18.20
III	30.40	16.00	14.40	-14.10	-32.12	18.02
IV	31.00	16.30	14.70	-13.40	-31.79	18.39

I; 第一气候态 (1961—1990年) the first climate state; II; 第二气候态 (1971—2000) the second climate state; III; 第三气候态 (1981—2010年) the third climate state; IV; 第四气候态 (1991—1992年) the fourth climate state

2.2 同气候态下极端气温事件的空间分布

根据三江源区不同气候态各个气象站点的极端温度阈值,分别统计不同气候态每个站点极端温度事件的

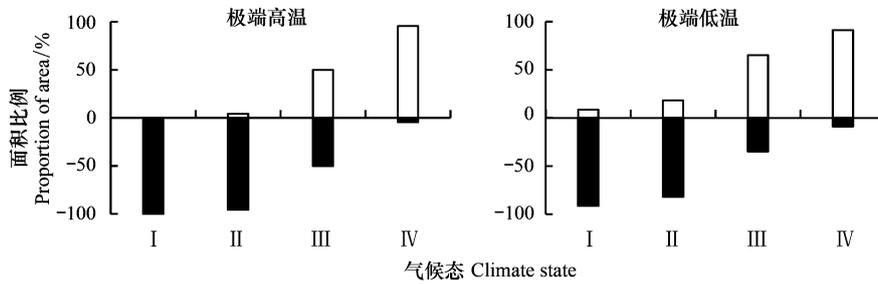


图 4 三江源区不同气候态与 60 年平均气候态的极端高温/极端低温阈值之差的正负占比统计

Fig.4 Positive and negative proportion statistics of the difference of extreme high/low temperature thresholds between different climatic states and average climate of 60 years in the Three-river Source Region

I :第一气候态 (1961—1990 年)the first climate state; II :第二气候态 (1971—2000) the second climate state; III :第三气候态 (1981—2010 年)the third climate state; IV :第四气候态 (1991—1920 年)the fourth climate state

频次和强度,其中,极端高温(极端低温)频次为某个站点的日最高气温(日最低气温)值超过(低于)阈值的 天数,强度是指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。据此,分别统计并分析近 60 年 三江源区不同气候态夏季极端高温与冬季极端低温事件的频次和强度的空间分布特征。

2.2.1 频次分布

分析图 5 可知,第 I 气候态中极端高温频次正增长占比 65.22%,其中 17.39%区域增速超过 1.5d/10a;第 II 气候态极端高温频次正向增加的区域扩大、增长显著,全区 91.30%的气象站点呈现上升趋势,平均频次 1.46d/10a;整个三江源区在第 III 气候态中极端高温频次均为正值,空间上基本呈现由西向东逐渐增加 的分布特征,平均频次达 4.06d/10a 之间;第 IV 气候态中除西部出现部分负增长外,其余地区极端高温频次基本呈正 趋势,和第 III 气候态经向分布特征较为一致,与第 I、II 气候态相反。

图 6 给出了不同气候态下,三江源区冬季极端低温频次的空间分布,与夏季极端高温频次相比,空间分布

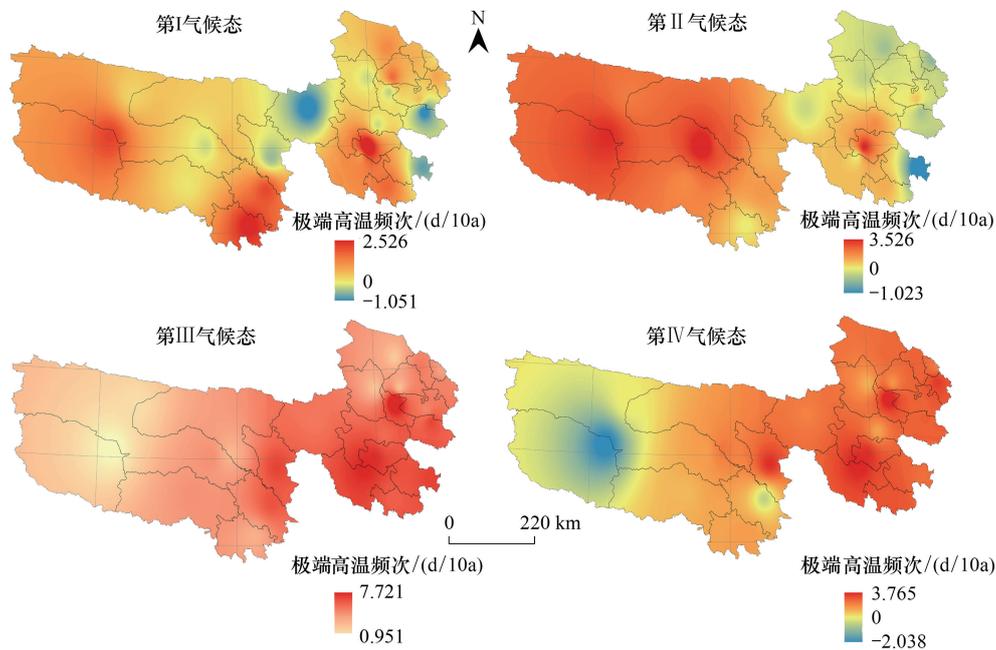


图 5 三江源区夏季极端高温频次

Fig.5 Frequency of extreme high temperature in summer in the Three-river Source Region

特征有所减弱。在第 I 气候态中,仅 21.74% 的区域极端低温频次增加速率为正,负值最小值基本集中在三江源区东北部的农业区;第 II 气候态极端低温频次正负占比约 3:7,平均正向增速达 2.65d/10a;极端低温发生次数在第 III 气候态呈现出全区域下降的空间分布特征,超过 20% 区域降幅多于 5d/10a;第 IV 气候态中除零星地区极端低温频次表现出 0.5d/10a 轻度增加,其余大部地区下降显著,平均降幅达 4.82d/10a。

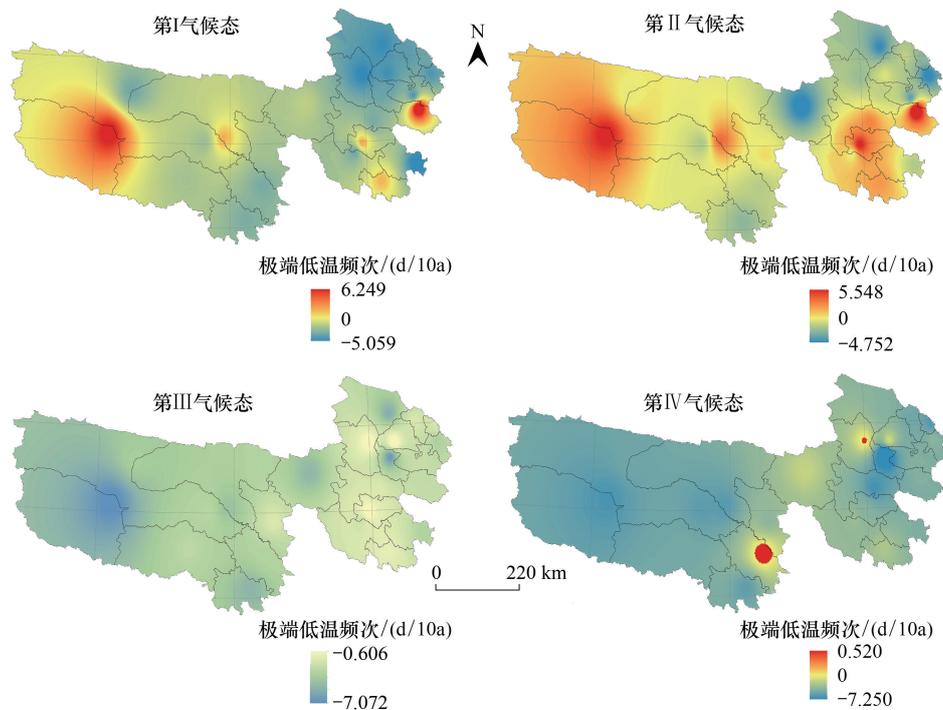


图 6 三江源区冬季极端低温频次

Fig.6 Frequency of extreme low temperature in winter in the Three-river Source Region

2.2.2 强度分布

极端高温强度较频次径向分布更显著,其中第 I 气候态基本表现为由西向东的递减趋势,强度正向增加速率较低,最大值 $0.18^{\circ}\text{C d}^{-1}(10\text{a})^{-1}$,表明大部地区极端高温事件集中于阈值附近;第 II 气候态中极端高温强度呈正增加趋势的区域逐渐扩张,尤其是三江源区高海拔为主的西部地区,增长速率均超过 $0.25^{\circ}\text{C d}^{-1}(10\text{a})^{-1}$,空间分布与第 I 气候态相似;第 III 气候态极端高温强度表现出自西向东递增的趋势,与第 I、II 气候态呈现经向对称特征,且集中在三江源区东北部低海拔的农业区;第 IV 气候态和第 III 气候态极端高温强度空间分布特征相似,负向增加区域略有扩张,正向增加区域增幅减小。

极端低温强度空间分布的区域性和规律性较极端高温强度有所减弱。第 I 气候态中 69.57% 呈负增长趋势,平均速率为 $-0.24^{\circ}\text{C d}^{-1}(10\text{a})^{-1}$,增加区域主要集中在三江源区东南部和唐古拉山附近,平均增幅 $0.79^{\circ}\text{C d}^{-1}(10\text{a})^{-1}$;第 II 气候态中正增长区域和第 I 气候态相近,但强度增速有所下降,平均值为 $0.34^{\circ}\text{C d}^{-1}(10\text{a})^{-1}$,正负增长区域比例约 4:6;第 III 气候态极端低温强度正增长平均速率仅 $0.09^{\circ}\text{C d}^{-1}(10\text{a})^{-1}$,整体上呈减弱趋势,低值中心在唐古拉山一带,为 $-1.03^{\circ}\text{C d}^{-1}(10\text{a})^{-1}$;第 IV 气候态整体空间分布特征与第 III 气候态类似,但高值中心发生转移,从三江源东北抬至兴海一带,增长速率也略微上升,负增长区域进一步扩大,占比达 82.61%。

2.2.3 基于正态分布切割线的平均气候态频次的空间分布

三江源区所有站点日最高、最低气温的正态分布偏度和峰度的空间分布如图 9 所示,均为负值,且绝对值小于 1,符合正态分布的同时,全部存在平均值小于中位数且正态分布相对平缓的特征,整体上偏度和峰度在

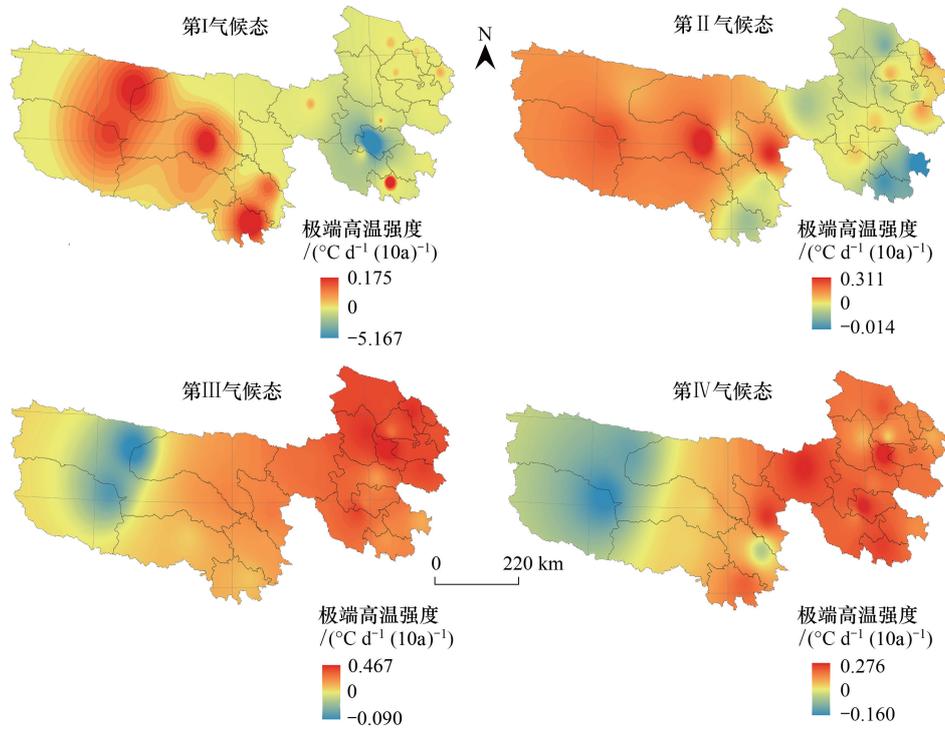


图 7 三江源区夏季极端高温强度

Fig.7 Strength of extreme high temperature in summer in the Three-river Source Region

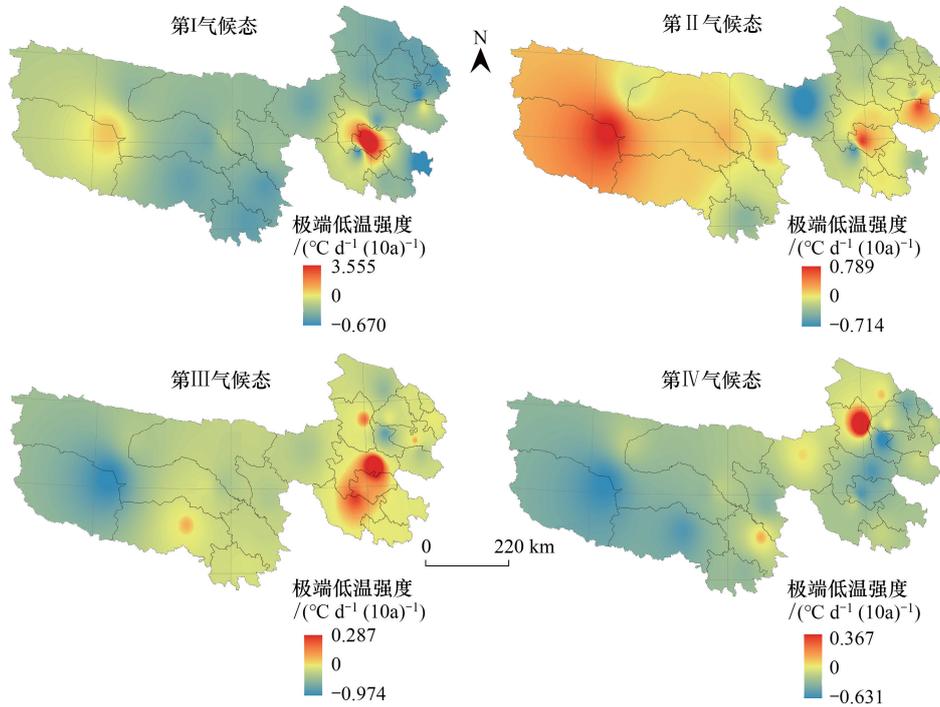


图 8 三江源区冬季极端低温强度

Fig.8 Strength of extreme low temperature in winter in the Three-river Source Region

日最高气温上的波动范围均小于日最低气温,表明日最高气温更符合标准的正态分布。

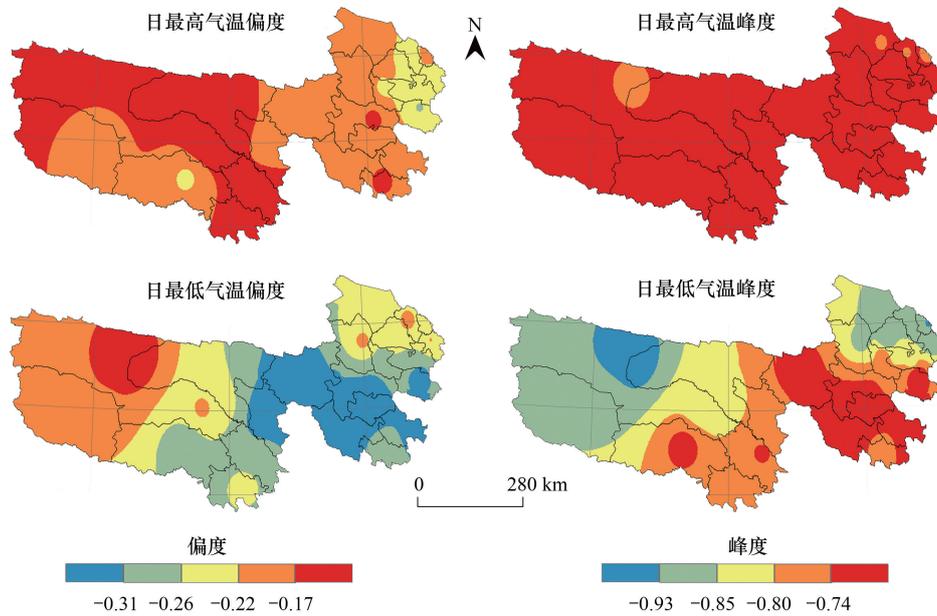


图9 1961—2020年三江源区日最高气温、日最低气温的偏度和峰度

Fig.9 Skewness and kurtosis of daily maximum and minimum temperature in the Three-river Source Region from 1961 to 2020

完成所有站点偏度和峰度的检验后,基于概率密度的正态分布切割计算得到1961—2020年三江源区日最高、最低气温正态分布发生概率在 $\mu \pm 2\sigma$ 之外的频次(图10),用来表征三江源区60年的极端高温和极端低温发生频次。极端低温频次空间分布特征较极端高温更加显著,总体呈现由东北和西北向中南增加的趋势,且发生次数远远超过极端高温。极端高温大致沿着阿尼玛卿山和巴颜喀拉山呈高频带状分布,山脉两侧频次逐渐降低。

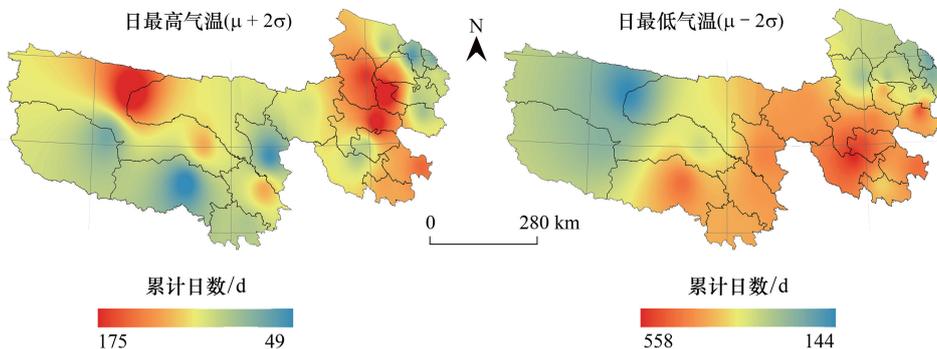


图10 1961—2020年三江源区日最高/最低气温大于 $\mu+2\sigma$ /小于 $\mu-2\sigma$ 的频次

Fig.10 The frequency of daily maximum temperature $>\mu+2\sigma$ and daily minimum temperature $<\mu-2\sigma$ in the Three-river Source Region from 1961 to 2020

2.3 不同气候态下极端气温事件的时间变化趋势

如图11所示,本文通过EOF将四个气候态极端气温序列做时间和空间的分离,由于时间序列的第一模态解释方差均大于50%,因此可以较好地表征三江源区不同气候态极端气温时间变化趋势。三江源区极端高温频次在第I—III气候态中均表现出显著的上升趋势,且全部通过0.01信度检验,其中第II气候态极端高温频次上升趋势最为显著,正趋势达0.604,与之对应的极端高温强度则呈现较显著的弱增长趋势。第III气候

态极端高温强度趋势系数在四个气候态中最大,且通过 0.05 信度检验,表明这一时期极端高温伴随着发生次数的增加极端性增加;第IV气候态极端高温频次和强度均略有增加,但都不显著。总体而言,极端高温频次和强度在四个气候态中一致性较好,均表现为增加趋势,但显著性有所差别。第II气候态和第III气候态极端高温的极端性相对突出,且发生频次增加幅度较大,1991 年之后极端温度增加趋势相对放缓,因此第IV气候态基本维持在阈值附近波动,与全球气候变暖的大背景相一致。

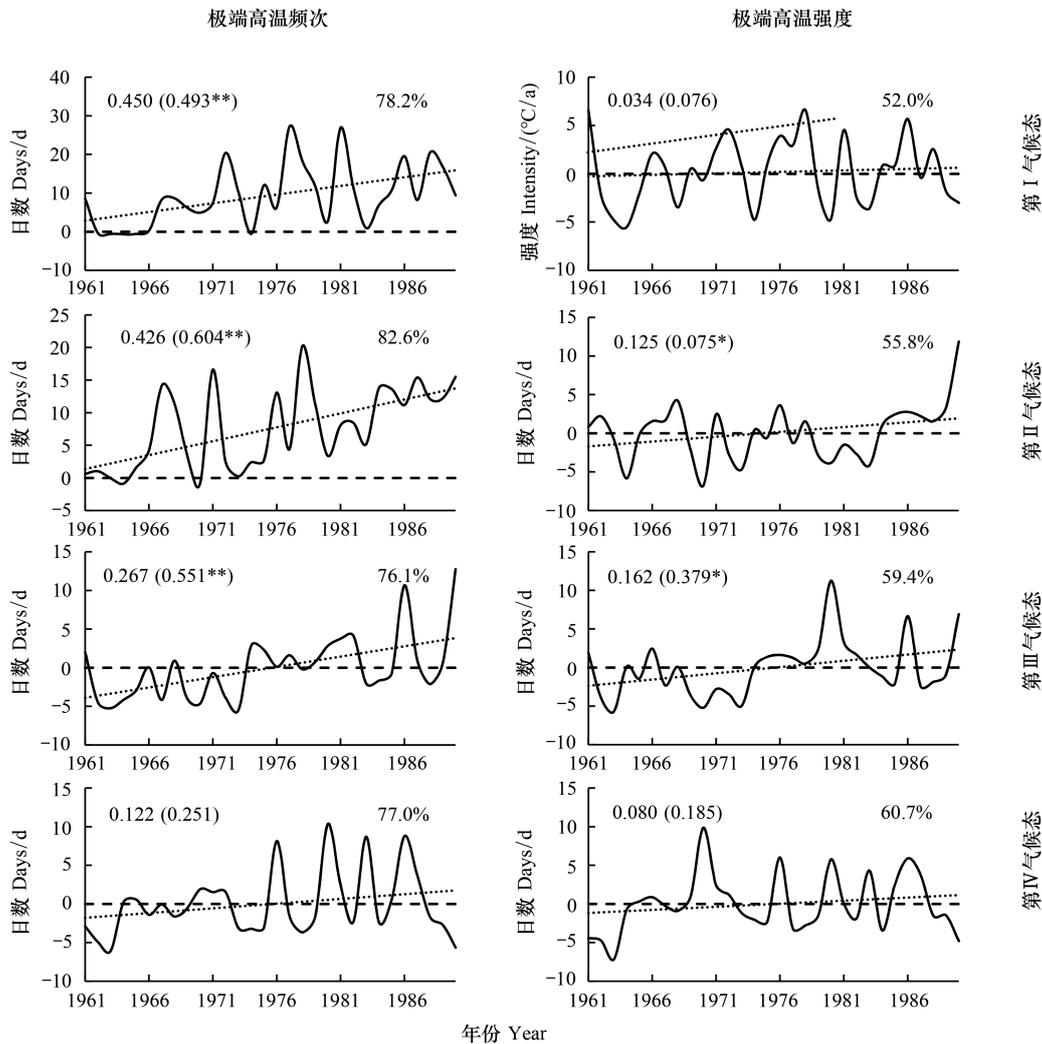


图 11 三江源区夏季极端高温频次和强度第一模态时间变化趋势

Fig.11 The first mode time variation trend of frequency and intensity of extreme high temperature in summer in the Three-river Source Region

左上括号外数字为气候倾向率,括号内数字为趋势系数,*表示显著性通过 0.05 信度检验,**表示显著性通过 0.01 信度检验;右上角百分比数字表示第一模态解释方差

极端低温在不同气候态中时间变化趋势特征并非全部一致。第I、II气候态中极端低温频次虽然均呈现出显著增加趋势,且通过 0.01 信度检验,但两者强度变化相反,第I气候态强度的显著减弱趋势表明整个三江源区极端低温发生次数尽管上升明显,但极端性降低,极端低温事件影响程度也快速下降,第II气候态强度表现出一定的增加趋势,极端性增加,表明冬季发生超过阈值的极端低温事件较多,对应低温雨雪冰冻灾害等相对较多;第III、IV气候态极端低温在频次和强度上变化趋势较为一致,均呈现快速下降趋势,且第IV气候态下降趋势较第III气候态更加显著。

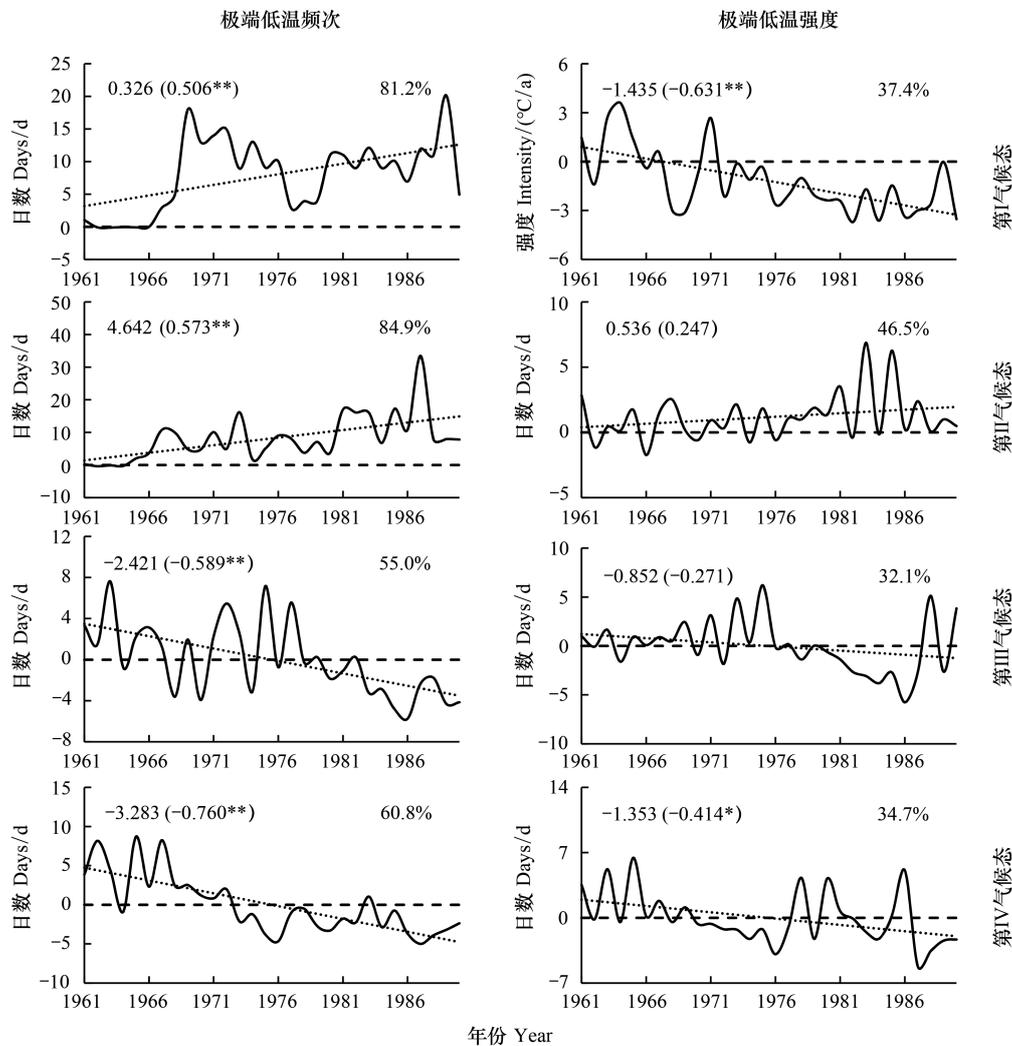


图 12 三江源区冬季极端低温频次和强度第一模态时间变化趋势

Fig.12 The first mode time variation trend of frequency and intensity of extreme low temperature in winter in the Three-river Source Region

左上角括号外数字为气候倾向率,括号内数字为趋势系数,*表示显著性通过 0.05 信度检验,**表示显著性通过 0.01 信度检验;右上角百分比数字表示第一模态解释方差

3 讨论

《中国气候变化蓝皮书(2020)》指出,中国是全球气候变化的敏感区和影响显著区,1951—2019年,中国年平均气温增温速率为 $0.24^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,明显高于同期全球平均水平,区域间差异明显,其中青藏高原地区增温速率最大。本文研究发现三江源区极端高温事件在不同气候态中整体上基本呈现出较为明显的增加趋势,与《蓝皮书(2020)》趋势一致,但不同气候态存在一定的时空差异。由表 3 可知,极端高温阈值与海拔和经度分别呈现较为显著的负相关和正相关关系,表明随着海拔的升高极端高温下降明显,自东向西递减趋势显著,不同气候态中均表现出强烈的一致性。极端高温频次和强度与阈值相比,增减趋势并未表现出一致性,第 I、II 气候态中极端温度频次、强度自西向东减少减弱,在一定程度上反映出在 20 世纪 60 初的暖期,4000m 以上高海拔地区对比 2000—3000m 的中海拔地区增温幅度更大,尤其是最高气温,这与丁明军等^[29]研究结论一致。80 年代中后期青海高原不同地区先后进入一个气温持续升高的阶段,受人类活动、臭氧总量、气溶胶含量变化等因素影响^[30—32],三江源东部地区极端高温频发,增加趋势显著高于西部地区。极端低温除阈值对海拔较为敏感外,在经度和纬度上均未表现出较为显著的相关关系,与极端高温类似的是,在第 I、II 气候态和第 III、IV 气候态中,西

部和东部频次和强度的趋势变化基本呈现反相位变化,且较极端高温变化程度更具显著性。

整体上,极端高温在不同气候态中变化趋势较为一致,且与海拔和经度关系较为显著,极端低温变化相对来说不确定性更强,其频次和强度变化特征具有不对称性,尤其是三江源西部地区,受多气候系统及环流遥相关共同影响,使得该区域气候变化的原因更为复杂^[33]。

表 3 三江源区不同气候态极端气温阈值、频次、强度和地理要素的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of extreme temperature threshold, frequency, intensity and geographical factors in different climatic states in the Three-river Source Region

气候态 Climate states	地理要素 Geographical elements	阈值 Threshold values		频次 Frequency		强度 Intensity	
		极端高温 Extreme high temperature	极端低温 Extreme low temperature	极端高温 Extreme high temperature	极端低温 Extreme low temperature	极端高温 Extreme high temperature	极端低温 Extreme low temperature
		I	纬度	0.39	0.13	-0.25	-0.27
	经度	0.55 **	0.40	-0.16	-0.30	-0.12	-0.10
	海拔	-0.95 **	-0.80 **	-0.04	0.40	-0.12	0.27
II	纬度	0.38	0.17	-0.28	-0.31	0.08	-0.19
	经度	0.53 **	0.40	-0.67 **	-0.24	-0.43 **	-0.30
	海拔	-0.94 **	-0.81 **	0.57 **	0.40	0.23	0.31
III	纬度	0.37	0.17	-0.24	0.07	0.50 **	-0.12
	经度	0.54 **	0.39	0.46 *	0.42 **	0.77 **	0.41
	海拔	-0.94 **	-0.80 **	-0.08	-0.20	-0.62 **	-0.20
IV	纬度	0.39	0.19	0.16	-0.08	0.02	0.18
	经度	0.56 **	0.37	0.67 **	0.09	0.60 **	0.20
	海拔	-0.95 **	-0.81 **	-0.34	0.03	-0.25	-0.11

* 表示显著性通过 0.05 信度检验; ** 表示显著性通过 0.01 信度检验

对三江源区极端气温频次强度和国省区域碳排放量、北半球相关大气环流指数资料进行格兰杰因果关系检验,进一步对极端气温变化归因分析进行讨论。由表 4 可知,表征东亚夏季风强弱的北太平洋副高脊线位置指数的增加是极端高温频次和强度增加的格兰杰原因,且存在 3 年滞后期。滞后 2 年的全国碳排放是三江源区极端高温强度增加的格兰杰原因,三江源区和青海省碳排放虽然和极端高温频次和强度有较好的正相关性,但均未通过格兰杰检验,说明地区碳排放不一定会对地区极端高温变化产生直接影响;对太平洋区极涡强度指数和极端低温频次做检验,滞后期 1 年、2 年均通过检验,表明北半球极涡在 1—2 年期间都可能对极端低温发生次数产生直接影响。此外,滞后 2 年青海省碳排放增加也是极端低温频次降低的格兰杰原因。东亚槽位置指数的增加直接影响极端低温强度,而东亚大槽是表征北半球冬季对流层中层中高纬度西风带强弱的重要指标,不同尺度碳排放虽然和极端低温强度存在负相关,但并未通过显著性检验和格兰杰检验。

表 4 格兰杰因果关系检验(1997—2019 年)

Table 4 Granger causality test (1997—2019)

被解释变量 The explained variable	解释变量 The explanatory variable	滞后期/a Time lags	置信概率 Confidence probability	相关系数 Correlation coefficient	
极端高温 Extreme high temperature	频次	北太平洋副高脊线位置指数	3	0.0266 *	0.477 *
	强度	北太平洋副高脊线位置指数	3	0.0415 *	0.417 *
		中国碳排放	2	0.0359 *	0.553 **
极端低温 Extreme low temperature	频次	太平洋区极涡强度指数	1	0.0147 *	0.556 **
			2	0.0002 **	0.820 **
	强度	青海省碳排放	2	0.0227 *	-0.737 **
		东亚槽位置指数	3	0.0447 *	0.447 *

* 表示显著性通过 0.05 信度检验; ** 表示显著性通过 0.01 信度检验;为节约篇幅,表中略去了部分检验结果

三江源区自然环境恶劣,道路闭塞、人员稀少,通信网络建设困难,气象站点较为稀疏,目前仅有 23 个国家级气象站,虽然有长时间序列且质量较好的数据,但覆盖度的精细化建设方面仍需进一步提升,才能更有效地满足本地气候资源及生态环境监测与治理的需要。

4 结论

本文通过划分四个基准气候态,研究三江源区不同气候态极端温度事件阈值、频次和强度的空间分布特征和时间变化趋势,并对其变化原因进行讨论。结论如下:

(1) 极端温度阈值整体变化与全球变暖趋势一致,基本表现为海拔越高阈值越低,且自东向西逐渐降低,不同气候态不同背景温度地区趋势有所不同,存在一定的非对称性增温的特征。

(2) 不同气候态极端高温频次和强度的空间分布区域性和规律性均优于极端低温,基本表现为第 I、II 气候态自西向东递减,第 III、IV 气候态自西向东递增的径向空间分布特征,在时间变化上呈现弱增加—迅速增加—增速放缓的整体增加趋势;极端低温空间分布与极端高温相似,但不同气候态中频次和强度时间变化趋势特征并非全部一致,第 I 气候态频次增加极端性降低,经历第 II 气候态短暂上升过程后,在第 III、IV 气候态下降显著,说明随着三江源区生态保护政策的实施,该地区脆弱的生态系统得以恢复^[34-35],极端温度事件的极端性逐渐稳定甚至下降。

(3) 极端高温与海拔和经度关系较为显著,极端低温变化相对来说不确定性更强,其频次和强度变化特征具有不对称性,尤其是三江源西部地区。综合近 23 年三江源区极端气温频次强度和国省区域碳排放量、北半球相关大气环流指数资料的格兰杰因果关系检验结果,进一步发现三江源区极端气温与东亚夏季风、中高纬度西风带、北半球极涡等环流系统遥相关,与国省碳排放也存在较好的相关性和因果关系,地区碳排放并未对地区极端气温变化产生直接影响,尤其是对极端低温。

参考文献 (References):

- [1] 张江,袁旻舒,张婧,李函微,王洁仪,张贤,鞠佩君,蒋海波,陈槐,朱求安. 近 30 年来青藏高原高寒草地 NDVI 动态变化对自然及人为因子的响应. 生态学报, 2020, 40(18): 6269-6281.
- [2] Chen R, Yang M X, Wang X J, Wang G N. Review on simulation of land-surface processes on the Tibetan Plateau. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2019, 11(2): 93-115.
- [3] 卓嘎,陈思蓉,周兵. 青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2018, 38(9): 3208-3218.
- [4] 周玉科. 1960—2012 年青藏高原极端气候时空动态与变异研究(英文). 资源与生态学报, 2019, 10(4): 397-414.
- [5] 李辉霞,刘国华,傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. 生态学报, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [6] 周秉荣,颜亮东,校瑞香. 三江源地区太阳辐射与日照时空分布特征. 资源科学, 2012, 34(11): 2074-2079.
- [7] 许吟隆,赵运成,翟盘茂. IPCC 特别报告 SRCCCL 关于气候变化与粮食安全的新认知与启示. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 37-49.
- [8] IPCC. *Climate change 2021: the physical science basis*. [2021-08-01]. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- [9] 陈晓光,张存杰. 西北区域气候变化评估报告. 北京: 中国科学技术出版社, 2013.
- [10] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [11] Karl T R, Kukla G, Razuvayev V N, Changery M J, Quayle R G, Heim Jr R R, Easterling D R, Fu C B. Global warming: evidence for asymmetric diurnal temperature change. *Geophysical Research Letters*, 1991, 18(12): 2253-2256.
- [12] Cohen J L, Furtado J C, Barlow M A, Alexeev V A, Cherry J E. Arctic warming, increasing snow cover and widespread boreal winter cooling. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(1): 014007.
- [13] Herold N, Ekström M, Kala J, Goldie J, Evans J P. Australian climate extremes in the 21st century according to a regional climate model ensemble: implications for health and agriculture. *Weather and Climate Extremes*, 2018, 20: 54-68.
- [14] Salman S A, Shahid S, Ismail T, Chung E S, Al-Abadi A M. Long-term trends in daily temperature extremes in Iraq. *Atmospheric Research*, 2017, 198: 97-107.
- [15] 冯晓莉,多杰卓么,李万志,申红艳,陈冀青. 1961—2018 年青海高原极端气温指数时空变化特征. 干旱气象, 2021, 39(1): 28-37.
- [16] 陈锐杰. 基于概率分布的青藏高原极端温度事件变化分析[D]. 西宁: 青海师范大学, 2018.

- [17] 游庆龙, 康世昌, 李潮流, 闫宇平, 燕士跃. 三江源地区 1961—2005 年气温极端事件变化. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 232-236.
- [18] 刘玲, 高素华, 王兰宁. 三江源地区气候突变及未来演变趋势分析. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 53-59.
- [19] 史展, 陶和平, 刘淑珍, 刘斌涛, 郭兵. 基于 GIS 的三江源区冻融侵蚀评价与分析. 农业工程学报, 2012, 28(19): 214-221.
- [20] 钱忠华, 侯威, 杨萍, 封国林. 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. 物理学报, 2011, 60(10): 819-830.
- [21] 林婧婧, 张强. 我国南北方气温和降水气候态变化特征及其对气候检测结果的影响. 气候变化研究进展, 2015, 11(4): 281-287.
- [22] 吕越敏, 李宗省, 冯起, 李永格, 袁瑞丰, 桂娟, 李宗杰, 张百娟. 近 60 年来祁连山极端气温变化研究. 高原气象, 2019, 38(5): 959-970.
- [23] 张琪, 李跃清. 近 48 年西南地区降水量和雨日的气候变化特征. 高原气象, 2014, 33(2): 372-383.
- [24] 陈鹏, 张继权, 张立峰, 孙滢悦, 刘晓静, 刘家福. 基于 EOF 与小波分析的松辽流域旱灾时空演变规律研究. 吉林师范大学学报: 自然科学版, 2016, 37(1): 151-156.
- [25] 王谋. 世界排放大国 CO₂ 排放和 GDP 的格兰杰因果分析及其对国际气候治理的影响和意义. 气候变化研究进展, 2018, 14(3): 303-309.
- [26] 周玉科. 青藏高原植被 NDVI 对气候因子响应的格兰杰效应分析. 地理科学进展, 2019, 38(5): 718-730.
- [27] 洪顺发, 郭青海, 何志超, 刘勇, 徐凌星, SimbiClaudien H. 基于格兰杰因果实证的城市绿地与经济发展互动机制研究. 生态学报, 2020, 40(15): 5203-5209.
- [28] 李林, 陈晓光, 王振宇, 徐维新, 唐红玉. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究. 气候变化研究进展, 2010, 6(3): 181-186.
- [29] 丁明军, 李兰晖, 张懿锂, 刘林山, 王兆锋. 1971—2012 年青藏高原及周边地区气温变化特征及其海拔敏感性分析. 资源科学, 2014, 36(7): 1509-1518.
- [30] 华文剑, 陈海山. 区域尺度土地利用/土地覆盖变化对气温日较差的影响. 气候变化研究进展, 2013, 9(2): 117-122.
- [31] Lawrence P J, Feddema J J, Bonan G B, Meehl G A, O'Neill B C, Oleson K W, Levis S, Lawrence D M, Kluzek E, Lindsay K, Thornton P E. Simulating the biogeochemical and biogeophysical impacts of transient land cover change and wood harvest in the community climate system model (CCSM4) from 1850 to 2100. *Journal of Climate*, 2012, 25(9): 3071-3095.
- [32] 吴浩, 许潇锋, 杨晓玥, 谢丽凤. 青藏高原及周边区域沙尘气溶胶三维分布和传输特征. 环境科学学报, 2020, 40(11): 4081-4091.
- [33] 强安丰, 汪妮, 魏加华, 魏霞, 牛升达. 近 50 年三江源地区云水资源分布及降水效率研究. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 574-593.
- [34] 刘世梁, 孙永秀, 赵海迪, 刘轶轩, 李明琦. 基于多源数据的三江源区生态工程建设前后草地动态变化及驱动因素研究. 生态学报, 2021, 41(10): 3865-3877.
- [35] 王钊, 王军邦. 三江源地区 2000—2015 年土壤侵蚀变化及生态恢复潜在影响研究(英文). 资源与生态学报, 2019, 10(5): 461-471.