

基于站点观测的中国大陆地区 1979—2019 年 骤冷骤热时空变化特征*

张未, 王程宇, 王大刚

中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510006

摘要: 在气候变暖背景下, 短期气温剧变会对人类社会与生态系统构成显著威胁。然而, 现有研究多关注温度的绝对变化, 对表征变化方向的“骤冷”与“骤热”尚缺乏充分探讨。鉴于此, 本研究基于中国气象局 1979—2019 年全国 2 295 个气象观测站点的逐日最高气温数据, 采用阈值法识别骤冷骤热现象, 并结合 Mann-Kendall 趋势检验法与线性回归模型, 探究其时空演变规律及影响因素。研究发现: (1) 空间上, 青藏高原周边地区为全国骤冷(9.37 次)、骤热(9.24 次)现象年均频率最高的区域, 而川渝地区增幅最为显著, 华南地区虽频率较低但呈快速上升趋势, 东北地区的频率接近全国平均水平但呈下降趋势; (2) 时间上, 骤冷骤热现象年变化模式均符合正弦波模式, 其中春季频率显著高于其他季节, 全国 60% 以上的站点骤冷骤热现象频率呈上升趋势; (3) 归因分析显示, 北极涛动(AO)正相位的加剧对东北地区骤冷现象频率下降具有一定影响, 而太阳短波辐射量的增加则是影响东部及西南地区骤热事件频率上升的关键因素。本研究可为我国各区域制定有效的气候变化适应策略提供科学依据。

关键词: 骤冷骤热现象; 全球变暖; 线性回归模型; Mann-Kendall 趋势检验法

中图分类号: P9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(XXXX)XX-0001-09

Temporal and spatial variation of abrupt cooling and warming in Chinese mainland based on site observations during 1979–2019

ZHANG Wei, WANG Chengyu, WANG Dagang

School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

Abstract: The increase in short-term temperature extremes, despite global warming, poses significant threats to ecosystems and society. However, most research has predominantly focused on absolute temperature changes rather than their direction, specifically, rapid cooling and heating events. Using daily maximum temperature data from 2 295 meteorological stations across China (1979–2019) provided by the National Meteorological Administration, this study employed the threshold method to identify such events. It systematically explored their spatiotemporal patterns and driving mechanisms by combining the Mann-Kendall trend test with linear regression models. The results show that the frequency was highest around the Tibetan Plateau (9.37 for cooling and 9.24 for heating events per year). While the Sichuan-Chongqing region experienced the most significant increase in these temperatures, southern China showed a rapid upward trend from a relatively low baseline. In contrast,

* 收稿日期: 2025-05-18

录用日期: 2025-11-19

网络首发日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2025A1515011666)

作者简介: 张未(2001年生), 男; 研究方向: 全球变暖与气候变化;

E-mail: zhangw329@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 王大刚(1975年生), 男; 研究方向: 极端气候变化, 陆面过程模拟;

E-mail: wangdag@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20250085

northeastern China exhibited a declining trend. The annual pattern of both cooling and heating events follows a sinusoidal wave, peaking significantly in spring. Over 60% of the stations show increasing trends. Attribution analysis indicates that the intensified positive phase of the Arctic Oscillation influenced the decrease in rapid cooling events in the northeast, while increased solar shortwave radiation was a key factor driving the rise in rapid heating events in eastern and southwestern China. This study can provide a scientific foundation basis for formulating effective climate change adaptation strategies across various regions of China.

Key words: abrupt cooling and warming; global warming; linear trend analysis; Mann-Kendall trend test

全球变暖不仅造成极端气象灾害的发生频率明显提升(Coumou et al., 2012),还引起了长短期气候变率的剧烈变化,目前已有大量研究运用相关性分析、回归分析、泊松分布等方法探究气候变率的改变对人类健康、农业、水文等方面的影响(Bathiany et al., 2018; Cai et al., 2022; Jung et al., 2017; Neukom et al., 2019)。然而,现有研究多聚焦于温度及其极端事件的长期变化趋势,对全球变暖背景下短期气候变率的关注相对不足。短期气候变率通常指时间尺度为几天至数周的气候波动,短期气候变率的增强可能加剧疟疾和流感等传染病的传播风险,且对陆地生态系统中农作物的生长产生不利影响(Liu et al., 2020; Paaijmans et al., 2010; Xiao et al., 2021; Zhan et al., 2017)。日温变率(DTD, day-to-day temperature)是短期气候变率研究中的关键指标,用于衡量日尺度的温度波动,对其开展量化研究始于Karl et al.(1995)提出的日温度变化公式,并被广泛应用到短期气候变率的研究中。以站点数据为基础,对全球DTD的变异性计算发现,北半球高纬度与热带地区的DTD变异性呈增大趋势,而中纬度地区变化相对平缓(Wan et al., 2021)。这一规律也在中国区域的研究中得到了印证,华南地区尤其是在夏季,DTD显著增大,而华北地区则呈现下降态势(Wang et al., 2022)。DTD还呈现出明显的季节性特征,北半球热带地区,旱季DTD变异性高于雨季(Ankrah et al., 2024);而在温带地区,冬季DTD均值则明显高于夏季(Huth et al., 2025)。然而,这些针对短期气候变率的研究对象多为气温变化的绝对值,并未对温度的不同变化方向即骤冷骤热展开讨论。

国内外针对短期气温变率变化原因的研究主要集中于人为强迫与大气环流的影响。人为强迫方面,有研究表明大部分DTD的变化都与人类活动有关,且随着全球变暖加剧,DTD的变异性还将进

一步增强(Wan et al., 2021)。具体来看,砍伐森林与城市化均会造成我国日温度变率进一步加剧,其中砍伐森林主要影响到我国温带地区(Ge et al., 2022),而城市化的影响更多体现在华南地区(Tong et al., 2022)。大气环流方面,部分学者基于地面观测站对日温度变率与北极涛动(AO, Arctic oscillation)、西太平洋副高(WPSH, Western Pacific subtropical high)等大气环流模式之间的相关性进行研究,发现DTD与AO呈负相关,而与WPSH呈正相关性,且通过与气温标准差的对比,发现局地气候因子也可能影响到DTD(Wang et al., 2022; Wu et al., 2017)。但上述研究基于温度变化的绝对值探究了DTD变化产生的原因,并未对骤冷骤热现象的原因分别展开讨论。

关于短期气候变率的研究对象多为温度变化量,而对于温度变化的方向性特征,即温度是骤然升高还是骤然降低,尚未展开深入探讨。本文将在已有对短期气候变率研究的基础上,进一步剖析骤冷骤热现象的时空变化规律,并分别探讨骤冷现象与骤热现象时空变化规律产生的原因。

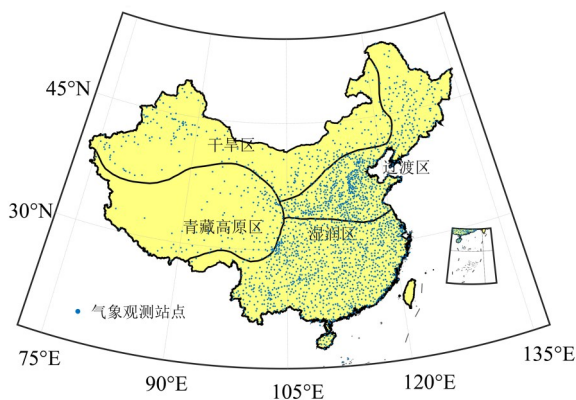
1 研究方案

1.1 研究区域与数据来源

日最高气温作为衡量气候冷暖变化幅度的重要参照,是评估极端气候事件强度的关键指标(马鹏里等, 2006),在界定骤冷骤热等气候异常现象时展现出显著的应用价值。本研究聚焦于中国大陆地区(港澳台地区未纳入本次研究分析范围),从中国气象局(<http://data.cma.cn/>)获取了2 416个气象站点的日最高气温数据(Lin et al., 2023)。原始数据集覆盖1951—2019年,将分析时段确定为1979—2019年,以避免早期站点数据缺失较多的问题。对站点数据进行均一化处理可以提高趋势分析的空间一致性(Xu et al., 2013; Xu et al., 2025)。然而,

由于对大量站点进行均一化处理的难度较高,本研究为保证结果的可靠性,在采用已通过严格质量控制数据(Lu et al., 2014)的基础上,参考相关文献进行了进一步筛选(Du et al., 2022; Xu et al., 2013; Xu et al., 2025; 杜勤勤等, 2018),剔除了缺测时间占比超过研究时段 10% 的站点,最终保留 2 295 个气象站的数据作为有效分析样本。本研究将持续关注数据集的更新,以便将更完整的数据纳入后续分析,从而得出更有意义的结论。

考虑到我国地域辽阔,骤冷骤热现象的成因错综复杂,参考相关文献,综合考虑地理特征与气候条件,将全国划分为湿润区、过渡区、干旱区以及青藏高原区四大气候区(Du et al., 2022),各气候区包含的气象站点数量分别为湿润区 1 095 个、过渡区 783 个、干旱区 260 个、青藏高原区 138 个。具体而言,湿润区与过渡区的分界线以年降水量 800 mm 等值线为基准,过渡区与干旱区的分界线则依据年降水量 400 mm 等值线划定,而青藏高原区的划分则主要基于其独特的地形起伏特征。各气候区的具体划分以及气候区内站点分布如图 1 所示。



审图号为 GS(2019)1822,底图边界无修改。

图 1 2 295 个气象站点分布与区域划分

Fig. 1 Distribution of 2 295 meteorological stations and regional division

1.2 研究方法

1.2.1 骤冷骤热现象定义

目前尚无骤冷骤热现象的统一定义,本研究使用相对阈值法对骤冷骤热现象进行定义,基于 Karl et al. (1995) 提出隔日温差的定义和公式,增加了对温度变化方向性的考量,计算得到某日的温度变化: $DTD = T_i - T_{i-1}$, i 表示日期的索引, T 表示该日最高温。

本研究基于全国范围内 2 295 个气象站点的日

最高气温数据,分别计算了每个站点升温与降温的 DTD。为了科学界定骤冷与骤热现象的判定标准,本研究对比了将 90%、95% 和 99% 分位数作为阈值的可行性。结果显示,若采用 99% 作为阈值,由于样本量不足,部分年份事件发生次数为 0,无法形成连续的时间趋势;而使用 95% 和 90% 分位数作为阈值时,两者计算得到的趋势差异小于 1%。综合考虑样本量及趋势稳定性,本研究最终选择样本量更丰富的 90% 分位数作为阈值。基于该标准,我们采用统计学方法,分别计算各站点升温和降温 DTD 数据的 90% 分位数,将其定义为该站点的骤热阈值 (T^+) 和骤冷阈值 (T^-)。

具体而言,若某站点在某日的 DTD 值,或是连续数日 DTD 的平均值超过 T^+ ,则判定该站点在该时间段内发生了 1 次骤热现象;相应地,若某日的 DTD 值,或连续数日 DTD 的平均值低于 T^- ,则判定为发生了 1 次骤冷现象。关于 DTD 的研究多聚焦于间隔 1、3、5 d 的多日平均值分析(Tong et al., 2022),然而,基于对中国区域气象数据的统计分析,本研究发现持续时间超过 3 d 的骤冷与骤热现象占比不足全部事件的 10%。因此,为了更精确地捕捉和分析骤冷骤热现象的特征,本文将研究重点放在持续时间 1~2 d 的升温与降温过程的 DTD 平均值上,以此作为研究骤冷骤热现象的核心数据集。

1.2.2 线性趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检验

Mann-Kendall 趋势检验法作为世界气象组织在气象研究领域重点推介的方法,在气象序列的统计分析及趋势判断方面具有广泛应用价值(陈赟等, 2023),其独特优势在于,即便数据本身不符合正态分布假设,该检验法仍能有效识别数据序列的变化趋势。本文将 Mann-Kendall 趋势检验法与线性回归模型相结合(杜懿等, 2021),以深入探究骤冷骤热现象的时间演变规律。具体而言,本研究首先运用 Mann-Kendall 趋势检验法对骤冷骤热现象的时间序列进行显著性检验,以确定其变化趋势是否显著,在确认时间序列具有显著趋势的基础上,进一步采用线性回归模型精确计算骤冷骤热现象变化趋势的气候倾向率,从而实现骤冷骤热现象频率变化趋势的量化评估与科学分析。

1.2.3 骤冷骤热现象频率影响因素探究

目前针对 DTD 变化的原因主要从大气环流(Wu et al., 2017)、人为强迫(Wan et al., 2021)两方面进行研究,但同时也发现,DTD 的变化与局地物理量之间

存在较强烈的联系(Wu et al., 2017),而针对大气环流的研究中,AO普遍被认为与DTD之间存在负相关关系(Liu et al., 2024; Wang et al., 2022)。在此基础上选择冬季AO指数(WAOI, winter arctic oscillation index),分别探究AO与骤冷现象与骤热现象频率的相关性,所选数据来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA, national oceanic and atmospheric administration,)。由于人为强迫的量化难度较高,本研究着重分析局地物理量与骤冷骤热现象之间的相关性。选取短波辐射作为关键因子,因其与温度变化之间存在较为明确的物理联系,且相关性表现良好。所用短波辐射数据来自ERA5数据集(空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)。本研究提取了各站点对应格点在骤冷骤热事件发生前的短波辐射变化量,对通过0.05水平显著性检验的站点结果进行深入分析。

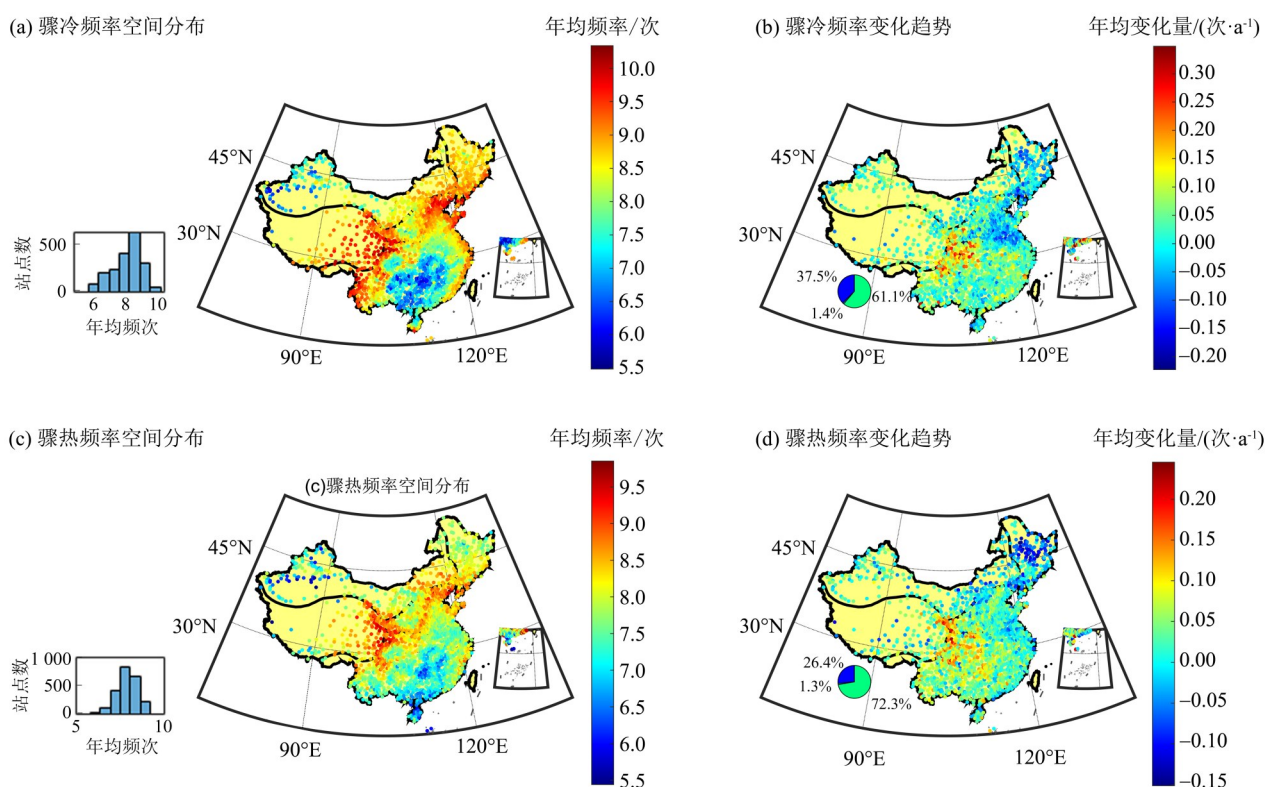
2 结果与讨论

2.1 骤冷骤热空间分布及趋势

图2展示了我国骤冷骤热现象频率的空间分布。图中所有站点均通过0.05水平的显著性检验,

且其数量占站点总数的90%以上。上述结果表明,骤冷骤热频率的变化在我国是一个普遍现象。具体而言,全国范围内骤冷现象的年均频率(8.34次)略高于骤热现象(7.84次)。约70%的站点其骤冷现象年频率超过8次,在沿海地区、青藏高原周边、云南西部及黄淮海平原等高发区的年均频率可达9.37次,而在华南和新疆等低发区的年均频率仅有6.24次。从变化趋势来看,全国大部分地区骤冷现象频率呈上升趋势,仅37.5%的站点(主要分布于华北和东北)发生频率有所下降,而骤冷骤热现象频率增长最快的站点集中在川渝地区。

骤热现象发生频率最高的站点大多集中在渤海湾与青藏高原周边区域,发生频率较低的站点则集中于华南与新疆地区。从全国范围来看,绝大部分地区的骤热现象频率呈上升趋势,仅在东北地区观测到较为明显的下降。与骤冷现象相比,骤热现象的整体发生频率相对较低,超过80%的站点其骤热频率低于骤冷频率,这一特征在云南和东北地区尤为明显(图2c),且59%的站点的年均频率低于8次,高发区主要集中在青藏高原周边地区,年均频



审图号为GS(2019)1822,底图边界无修改。

图2 基于日最高温度观测的骤冷骤热现象频率空间分布及变化趋势

Fig. 2 Spatial variation trends in the frequency of abrupt cooling and warming events based on daily maximum temperature

率为 9.24 次, 略低于骤冷现象高发区的频率。但骤热现象频率增速为 0.029 次/a, 略快于骤冷现象的 0.025 次/a, 且骤热现象呈现上升趋势的站点数量达 1 659 个, 较骤冷现象多出 10% 以上。

2.2 骤冷骤热现象时间变化趋势

2.2.1 骤冷骤热现象年周期与年变化趋势 图 3 展示了四大气候区各月份骤冷骤热现象的平均发生频率, 以及各气候区内所有站点骤冷骤热现象的平均阈值, 四个气候区骤冷骤热现象的年周期均呈现正弦型变化趋势。在这 4 个区域中, 骤冷骤热现象年周期波动幅度均最小的气候区均是青藏高原区, 骤冷骤热现象年周期波动最大的气候区为过渡区和湿润区。四大气候区的骤冷骤热现象发生频率呈现出相似的年周期变化规律。1—5 月, 骤冷骤热现象发生频率略微下降后持续增长到峰值, 其中骤冷现象均在 4 月达到峰值, 而骤热现象的峰值时间存在区域差异: 湿润区与青藏高原区的峰值出现在 4 月, 过渡区与干旱区的峰值则延迟到 5 月, 达到峰值后发生频率持续下降直至最低值后回升。不同气候区骤冷骤热现象最低值出现时间差异较大;

此外 8—11 月, 各气候区的骤冷现象发生频率均高于骤热现象, 而 12 月至翌年 2 月则相反。

研究期间内, 全国骤冷、骤热现象年均频率分别增加了 5%、8%, 且除过渡区外, 各气候区骤冷骤热现象年均频率均有一定增长, 同一气候区骤冷现象平均阈值的绝对值均略高于骤热现象。图 3 和表 1 显示, 湿润区骤冷骤热现象平均阈值为四大气候区中次低, 年均频率为最低, 但其频率增长幅度居首, 骤冷、骤热现象的年均频率分别增长了 16%、19%。过渡区骤冷骤热现象的平均阈值在四大气候区中居首, 年均频率为次高, 但值得注意的是, 该区域是唯一骤冷骤热发生频率下降的气候区, 骤冷、骤热现象年均频率分别下降 8%、4%。干旱区骤冷骤热现象平均阈值为次高, 但骤冷骤热现象的年均频率与增长幅度均处于较低水平, 骤冷现象年均频率增长幅度仅 5%, 骤热现象的增长幅度更是低于 1%。青藏高原区骤冷骤热现象平均阈值为四大气候区最低值, 但其年均频率与增长幅度均处于较高水平, 骤冷、骤热现象发生频率的增幅分别为 13% 与 18%。

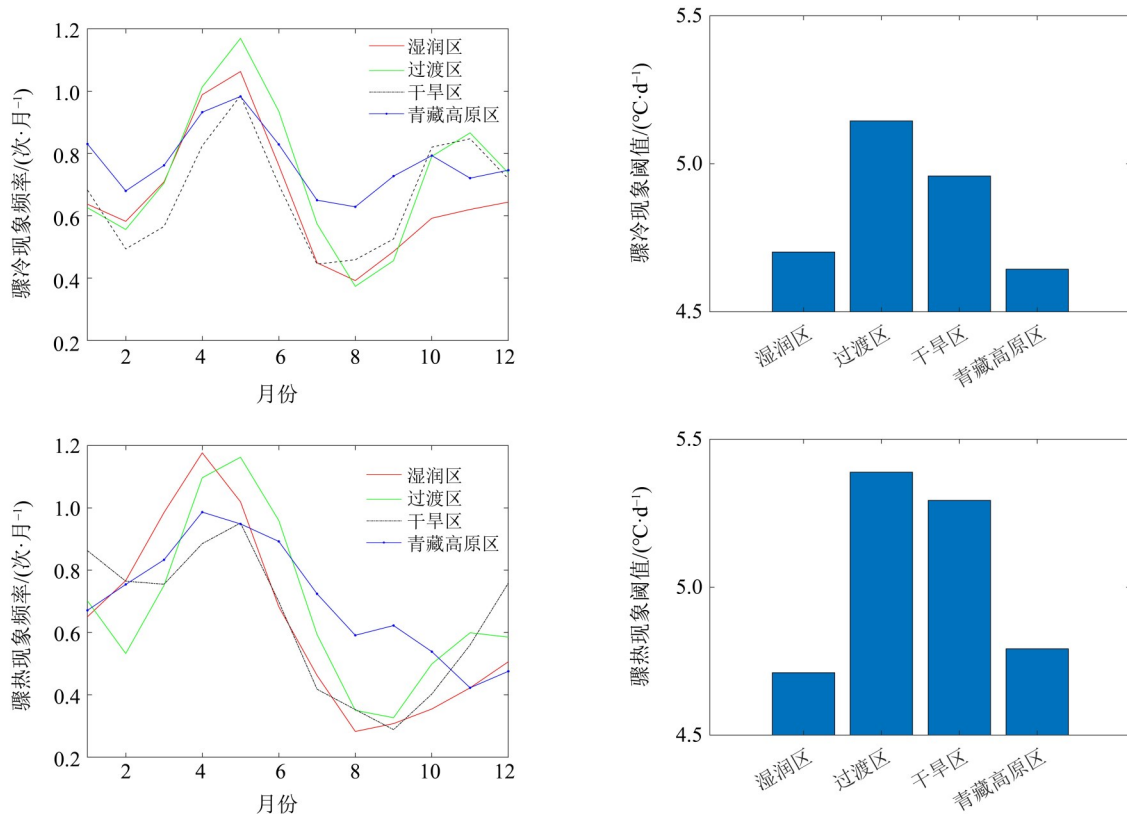


图 3 四大气候区骤冷骤热现象月频率及平均阈值

Fig. 3 Monthly frequency and mean thresholds of abrupt cooling and warming events across four major climatic zones

2.2.2 骤冷骤热现象季节变化趋势 按照气象划分法(张龙斌等,2024)的季节定义,进一步对1979—2019年四大气候区骤冷骤热现象变化趋势进行季节分析(表1与图4)。研究显示,春季是骤冷骤热现象发生频率最高的季节,其骤冷和骤热现象频率分别占全年总频率的36%和32%。四大气候区季节、区域差异显著,湿润区与过渡区春季骤冷骤热现象的发生频率明显高于冬季,而干旱区与青藏高原区冬、春季频率差别较小;而尽管过渡区与青

高原区在夏季的骤热现象频率高于冬季,四大气候区夏、秋季的骤冷骤热现象发生频率也仅占全年频率的39%、45%,这种区域差异可能与不同气候区的水热条件以及季节变化特征密切相关。鉴于冬、春在全年骤冷骤热现象中的主导地位(骤冷现象第二高发季节均为冬季),本研究重点对春季(3—5月)和冬季(12月至翌年2月)的骤冷骤热现象变化趋势进行了深入探讨。

表1 不同季节与气候区骤冷骤热现象发生频率
Table 1 Frequency of abrupt cooling and warming events by season and region

区域	骤热现象/次					骤冷现象/次				
	春季	夏季	秋季	冬季	全年	春季	夏季	秋季	冬季	全年
湿润区	3.18	1.43	1.09	1.92	7.62	2.76	1.60	1.70	1.86	7.93
过渡区	3.01	1.90	1.43	1.82	8.16	2.88	1.88	2.11	1.92	8.81
干旱区	2.59	1.47	1.25	2.39	7.70	2.38	1.61	2.19	1.90	8.07
青藏高原区	2.77	2.21	1.58	1.90	8.46	2.68	2.11	2.24	2.26	9.29

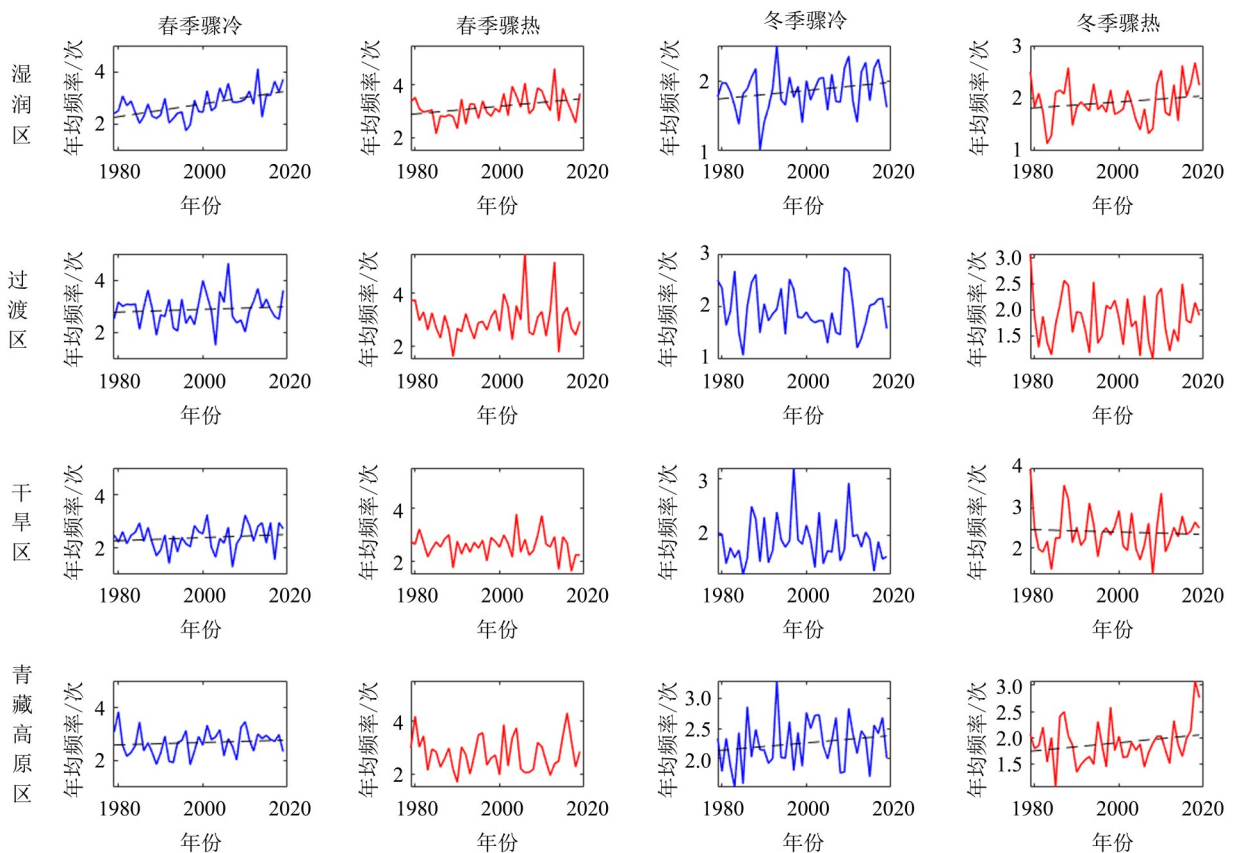


图4 基于日最高温观测的骤冷骤热现象频率春冬季的变化趋势

Fig. 4 Seasonal variation trends in frequency of abrupt cooling and warming events based on daily maximum temperature observations during spring and winter

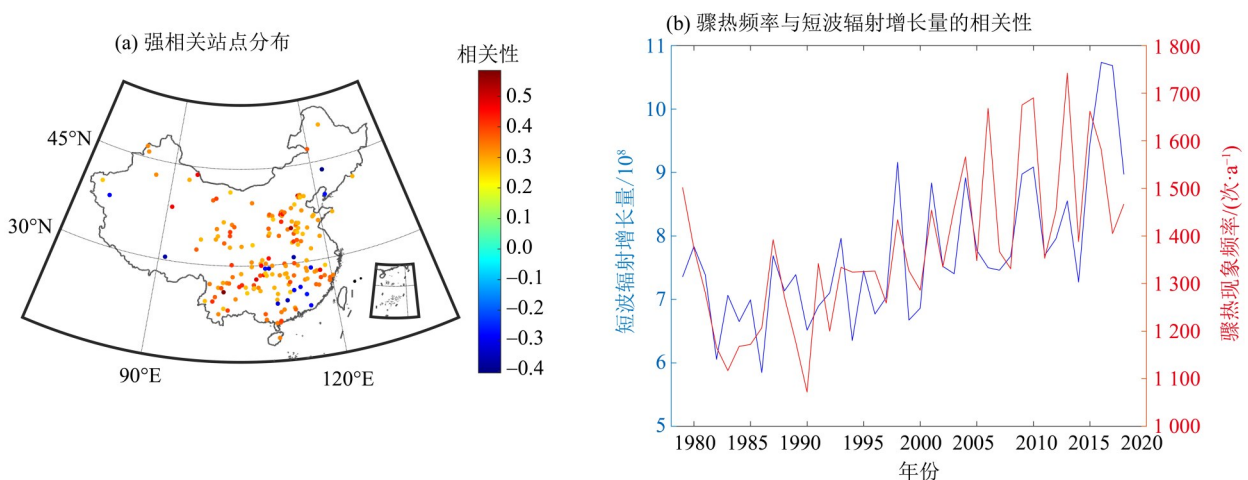
图 4 反映了四大气候区在研究期间春、冬季的变化趋势。具体而言,湿润区春季骤冷和冬季骤热现象的发生频率增幅均超过 20%,且均通过 0.05 水平的显著性检验。其中,春季骤冷和骤热频率分别增加了 0.64 和 0.11 次,冬季则分别增加了 0.13 和 0.51 次。过渡区与干旱区的骤冷骤热频率变化相对平缓:过渡区仅春季骤冷现象通过 0.05 水平的显著性检验,而干旱区通过 0.05 水平的显著性检验的为春季骤冷和冬季骤热现象。除干旱区春季骤热频率减少 12% 以外,其余变化幅度均低于 10%。青藏高原区冬季骤冷与骤热现象增长较为显著,增幅分别达到 12% 和 20%,相应频次增加了 0.30 和 0.43 次,且均通过显著性检验;而春季骤冷和骤热频率变化较小,仅分别减少 0.03 次和增加 0.07 次,变化幅度均低于 3%,其中春季骤热现象未通过 0.05 水平的显著性检验。

2.3 骤冷骤热现象影响因素

短波辐射是对温度变化量影响最大的局地物理量之一。在 90% 置信水平下,研究区域内 176 个站点在骤热现象发生前均观测到短波辐射量的增长,且短波辐射增长量的年际变化趋势与骤热现象频率的年际变化趋势呈正相关,这一结果表明短波辐射增强可能是引发骤热事件的重要因素。由图 5a 可以看出,我国东部以及云南地区短波辐射对骤热现象影响较大。为定量分析两者之间的相关性,将站点的骤热现象发生频率求均值,并与对应格点骤热现象发生前的短波辐射增长量求相关性。本研究发现,在 95% 置信度条件下,骤热现象频率与短波辐射增长量的相关

性达 0.68,呈明显的正相关性(图 5b);说明在东部以及云南地区短波辐射量的增长是骤热现象频率增加的重要原因,但骤冷现象频率与短波辐射减少量之间的相关性不显著,且相关站点分布无明显空间聚集性,因此不做讨论。

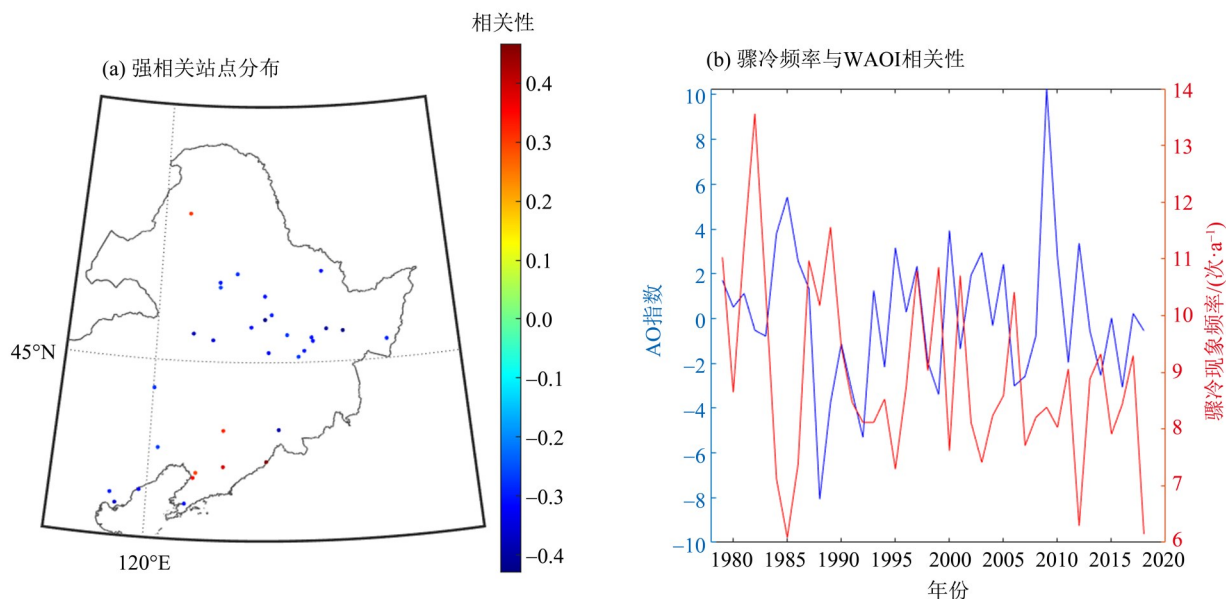
大气环流同样对我国骤冷骤热现象的发生频率有一定影响,例如有研究表明 WAOI 呈上升趋势且与我国东北地区的气温日较差呈现明显的负相关性(Wu et al., 2017),本文基于这些研究,进一步细化分析了 AO 对骤冷骤热现象的影响。综合考虑 AO 主要影响冷空气南下的难易程度,以及骤热现象与 AO 的相关性通过显著性检验的站点数量远少于骤冷现象,因此仅探讨 AO 对东北地区冬季骤冷现象发生的影响。将 1979—2019 年 WAOI 与同期东北地区各个站点骤冷现象发生频率求相关性,图 6a 展示了通过检验的 26 个站点的空间分布情况以及其骤冷频率与 WAOI 的相关性,图 6b 则呈现了通过检验的站点在 1979—2019 年冬季,骤冷现象年发生频率的平均值与 WAOI 变化的对比关系。基于图 6b 的统计分析表明,在 95% 置信水平下,东北地区 WAOI 与骤冷现象发生频率存在显著负相关性($r=-0.36, P<0.05$)。这一结果在图 6a 中得到进一步验证,82% 的气象站点均表现出负相关,表明两者之间的负相关性具有较高的可信度。而 WAOI 在 2001—2019 年的平均值为 0.389,明显高于 1979—1999 年的平均值(-0.174),而这期间 AO 正相位的频繁出现表明北极地区长期处于高压状态,这导致了冷空气南下的难度增大,进而使得东北地区冬季的骤冷现象频率出现一定下降。



审图号为GS(2019)1822,底图边界无修改。

图5 骤热现象与短波辐射增长量的相关性

Fig. 5 Correlation between abrupt warming events and shortwave radiation increment



审图号为GS(2019)1822,底图边界无修改。

图6 东北地区骤冷现象频率与WAOI相关性

Fig. 6 Correlation between the frequency of abrupt cooling events and WAOI in Northeast China

3 结论

本研究基于1979—2019年中国区域站点日最高温度数据,采用阈值定义法识别骤冷骤热现象,分析其空间分布特征和时间变化趋势,并探讨影响骤冷骤热现象发生频率的因素,结论如下:

1) 骤热骤冷现象年周期均呈现正弦型变化,且骤冷现象阈值略高于骤热现象。全国范围内骤冷骤热年均频率呈增长趋势,其中冬春两季增长最为明显。骤冷骤热现象在冬、春季的发生频率略高于夏、秋季,且春季发生频率明显高于其他3个季节。

2) 由于系统化订正全国范围2295个站点难度较高,因此本研究未对数据进行均一化处理,可能导致空间分析结果存在一定偏差,但通过选取高质

量数据并进行严格筛选,确保了研究结果整体可靠。在全国范围内,骤冷现象年均频率高于骤热,但骤热现象年均频率增长速度更快。骤冷骤热现象发生频率最高的区域为青藏高原周边地区,而增长速度最快的区域则是川渝地区,东北地区骤冷骤热现象的发生频率均呈现明显下降趋势。

3) 北极涛动正相位频繁出现与东北地区冬季骤冷现象频率降低存在较强相关性,但与骤热现象之间的相关性较弱。此外局地气象物理量中短波辐射是我国东部及云南地区骤热现象频率增加的重要因素之一,但其对骤冷现象发生频率的影响较为有限。后续研究将在当前相关性分析的基础上,借助气候模型工具进一步揭示其内在物理机制。

参考文献:

- 陈赅,沈浩,王晓慧,等,2023.基于Mann-Kendall趋势检验的城市能源碳达峰评估方法[J].上海交通大学学报,57(7):928-938.
- 杜勤勤,张明军,王圣杰,等,2018.中国气温变化对全球变暖停滞的响应[J].地理学报,73(9):1748-1764.
- 杜懿,王大刚,祝金鑫,2021.基于CMIP5的中国西北地区暖湿化演变研究[J].水资源与水工程学报,32(5):61-69+77.
- 马鹏里,张强,杨兴国,等,2006.近地层日最高最低气温变

化特征[J].气象科技,34(1):83-87.

张龙斌,王璐,孟磊,等,2024.1981—2020年北京地区气温时空变化特征分析[J].气象水文海洋仪器,41(1):60-63+67.

ANKRAH J, MONTEIRO A, MADUREIRA H, 2024. Temperature variability in coastal Ghana: A day-to-day variability framework[J]. Theor Appl Climatol, 155(7): 6351-6370.

BATHIANY S, DAKOS V, SCHEFFER M, et al, 2018.

- Climate models predict increasing temperature variability in poor countries[J]. *Sci Adv*, 4(5): eaar5809.
- CAI W, NG B, WANG G, et al, 2022. Increased ENSO sea surface temperature variability under four IPCC emission scenarios[J]. *Nat Clim Change*, 12(3): 228–231.
- COUMOU D, RAHMSTORF S, 2012. A decade of weather extremes[J]. *Nature Clim Change*, 2(7): 491–496.
- DU Y, WANG D, ZHU J, et al, 2022. Intercomparison of multiple high-resolution precipitation products over China: Climatology and extremes[J]. *Atmos Res*, 278: 106342.
- GE J, LIU Q, ZAN B, et al, 2022. Deforestation intensifies daily temperature variability in the northern extratropics [J]. *Nat Commun*, 13(1): 5955.
- HUTH R, KRAUSKOPF T, 2025. European climatology of day-to-day surface air temperature difference in multiple data sets[J]. *Int J Climatol*, 45(8): e8839.
- JUNG M, REICHSTEIN M, SCHWALM C R, et al, 2017. Compensatory water effects link yearly global land CO₂ sink changes to temperature [J]. *Nature*, 541(7638): 516–520.
- KARL T R, KNIGHT R W, PLUMMER N, 1995. Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century [J]. *Nature*, 377(6546): 217–220.
- LIN H, YANG Y, WANG S, et al, 2023. Evaluation of MSWX bias-corrected meteorological forcing datasets in China[J]. *Sustainability*, 15(12): 9283.
- LIU Q, FU C, XU Z, 2024. Revisiting two indices measuring high-frequency daily variability [J]. *Int J Climatol*, 44(8): 2792–2807.
- LIU Q, TAN Z M, SUN J, et al, 2020. Changing rapid weather variability increases influenza epidemic risk in a warming climate[J]. *Environ Res Lett*, 15(4): 044004.
- LU E, ZENG Y, LUO Y, et al, 2014. Changes of summer precipitation in China: The dominance of frequency and intensity and linkage with changes in moisture and air temperature[J]. *J Geophys Res Atmos*, 119(22): 12575–12587.
- NEUKOM R, BARBOZA L A, ERB M P, et al, et al, 2019. Consistent multi-decadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era [J]. *Nat Geosci*, 12(8): 643–649.
- PAAIJMANS K P, BLANFORD S, BELL A S, et al, 2010. Influence of climate on malaria transmission depends on daily temperature variation[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 107(34): 15135–15139.
- TONG X, WANG P, WU S, et al, 2022. Urbanization effects on high-frequency temperature variability over South China[J]. *Urban Clim*, 42: 101092.
- WAN H, KIRCHMEIER-YOUNG M C, ZHANG X, 2021. Human influence on daily temperature variability over land[J]. *Environ Res Lett*, 16(9): 094026.
- WANG X, WU G, QIN Y, 2022. Day-to-day temperature variability in China during last 60 years relative to Arctic oscillation[J]. *Earth Space Sci*, 9(12): e2022EA002587.
- WU F T, FU C, QIAN Y, et al, 2017. High-frequency daily temperature variability in China and its relationship to large-scale circulation [J]. *Int J Climatol*, 37(2): 570–582.
- XIAO Y, MENG C, HUANG S, et al, 2021. Short-term effect of temperature change on non-accidental mortality in Shenzhen, China[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 18(16): 8760.
- XU Q, WEI S, LI Z, et al, 2025. A new evaluation of observed changes in diurnal temperature range [J]. *Geophys Res Lett*, 52(2): e2024GL113406.
- XU W, LI Q, WANG X L, et al, 2013. Homogenization of Chinese daily surface air temperatures and analysis of trends in the extreme temperature indices[J]. *J Geophys Res Atmos*, 118(17): 9708–9720.
- ZHAN Z, ZHAO Y, PANG S, et al, 2017. Temperature change between neighboring days and mortality in United States: A nationwide study[J]. *Sci Total Environ*, 584: 1152–1161.

(责任编辑 江 睿)