中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 6 期： 2098–2111
论 文
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

全球不同气候区极端气温时空变化及其与大气环流的关系

杨熙萌[1]，高红凯[2,3*]，姬广兴[1*]，陈亚宁[4]

1. 河南农业大学资源与环境学院，郑州 450046
2. 华东师范大学地理科学学院，上海 200241
3. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室，上海 200241
4. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，乌鲁木齐 830011
* 通讯作者，E-mail：hkgao@geo.ecnu.edu.cn(高红凯)，guangxingji@henau.edu.cn(姬广兴)

2025-05-27收稿，2026-02-06修回，2026-02-26接受，2026-05-20网络版发表
国家重点研发计划项目(2024YFE0113200)、国家自然科学基金项目(42471040)和河南省自然科学基金项目(252300420849)资助

摘要 全球变暖背景下极端气温事件频发，对生态安全和社会经济可持续发展构成严峻威胁。揭示多气候区极端气温时空分异规律及其驱动因素，是应对气候变化的核心科学问题之一。本研究基于ERA5再分析数据和88种大气环流指数，通过趋势分析-相关性检验-地理探测器模型的多方法耦合框架，解析1951–2024年全球13个气候区极端气温事件的演变特征及其与大气环流的关系。结果表明：(1)全球大部分区域的极端暖事件呈增长趋势，全球大部分区域的极端冷事件呈减少趋势。(2)极端气温事件的空间异质性特征显著。冷日持续日数(CSDI)在欧亚大陆大部分区域呈上升趋势，高纬度气候区霜冻日数(FD)和结冰日数(ID)减少速率大于其他区域，中高纬度气候区极值指数(TNn、TNx、TXn和TXx)增加速率比低纬度地区高。(3)北半球副高面积指数(NHSHA)、北美区极涡面积指数(NAPVA)、南极涛动指数(AAO)和亚洲区极涡强度指数(APVI)对全球极端气温变化具有突出影响。(4)大气环流因素交互作用会对极端气温事件变化产生非线性增强或双因子增强效应，双因子协同解释力(q=0.26–0.84)较单因子(q=0.06–0.79)提升3%–67%。本研究从多尺度互馈角度深化了大气环流对极端气温影响的认知，为制定区域差异化气候适应策略提供科学依据。

关键词 极端气温，气候区，时空变化，大气环流，全球

1 引言

近百年来，全球气候变暖日益明显，与工业化前相比，2019年全球平均气温增长了大约1.09 ℃(陆春晖等，2024)。在气候变暖背景下，冬季变得温暖，夏季更加炎热，由此导致的高温等极端气温事件(ETE)的发生频率和强度更高(翟盘茂和刘静，2012；王琼等，2013)，不仅直接影响作物生长和农业生产(Dong等，2023)，还对人类健康产生了严重危害(Xu等，2018)。因此，为了减少极端气温事件对人类社会和自然环境的不利影响，我们迫切需要更深入地了解极端气温事件的变化特征和驱动因素，以期为气候变化研究、灾害风险评估和政府决策制定提供依据。

许多学者已从多个空间尺度上探讨了极端气温事件的时空变化特征(Andrade等，2012；Donat等，2013；Feng等，2018)。Alexander等(2006)研究发现全球大部分地区极端气温在20世纪后50年都表现出暖夜增多、冷夜减少的特点。Abadi等(2020)分析了埃塞俄比亚西部半干旱区极端气温的变化特征，结果发现研究区极端高温有上升趋势。Alexander和Arblaster(2017)研究发现澳大利亚极端气温呈上升趋势。同时也有研究表明，欧洲、俄罗斯、印度、美国和中国等地区极端高温日数增加和极端低温日数减少的变化趋势(Choi等，2009；Kothawale等，2010；Zhou等，2016；杨阳等，2022)。由此可见，在全球气候变暖的背景下，不同空间尺度上的极端暖事件大都呈现增加趋势，极端冷事件呈现减少趋势，但不

中文引用格式：杨熙萌, 高红凯, 姬广兴, 陈亚宁. 2026. 全球不同气候区极端气温时空变化及其与大气环流的关系. 中国科学: 地球科学, 56(6): 2098–2111, doi: 10.1360/SSTe-2025-0150
英文引用格式：Yang X, Gao H, Ji G, Chen Y. 2026. Spatio-temporal variation of extreme temperature in different climatic regions of the world and its large-scale atmospheric circulation mechanism. Science China Earth Sciences, 69(6): 2049–2061, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1884-2

© 2026《中国科学》杂志社

同区域极端气温事件的时空变化特征具有区域差异。

许多学者发现大尺度大气环流的波动和异常变化是影响极端气温事件发生和变化的关键因素(Li等，2012；Loikith和Broccoli，2012，2015；Horton等，2015；Bieniek和Walsh，2017；张仪辉等，2022；Hou等，2023)。He和Wang(2015)发现，北极涛动正相位导致亚洲和欧洲显著变暖。Huang等(2021)发现在平流层极地涡旋减弱和北极涛动负相的条件下，北半球发生极端冷空气爆发的可能性增加。Zhong等(2017)发现中国松花江流域的亚洲极地涡旋指数与寒冷指数呈显著正相关。极地涡旋面积和强度指数也与中国的寒潮天数呈正相关(Gao等，2021)。大尺度大气环流对极端气温的影响研究方兴未艾，但已有研究主要集中在区域尺度上(Yu等，2017；Rashid等，2020；Olmo等，2020；Zhang K 等，2020；Zhang等，2023；Li和Sun，2025；van Westen和Baatsen，2025)，大气环流对全球尺度极端气温远程相关性的研究还较为缺乏。此外，已有研究多使用双变量分析方法分析极端气温事件与大气环流因子之间的相关性(Tong等，2019；Adams等，2021；Luo等，2024；Huang等，2025；Chen等，2025；Uckan等，2025；Wang等，2025)，忽略了大气环流因素的交互作用对极端气温事件的综合影响(Li等，2025)。因此，本研究将致力于分析大气环流交互作用对全球尺度极端气温事件的影响。

首先，我们筛选出9个极端气温指数来描述全球13个气候区极端气温事件的时空变化，计算其与88项大气环流指数之间的相关系数矩阵，使用相关系数阈值法解决大气环流因子可能存在的共线性问题。然后，使用皮尔逊相关性分析方法识别影响全球13个气候区极端气温事件变化的主导大气环流因素。最后，使用地理探测器法(GDM)量化大气环流交互作用对全球13个气候区极端气温事件的影响程度。本研究有助于进一步厘清全球极端气温的时空演变特征，并为相关学者在全球不同气候区制定粮食生产和生态环境管理方案提供科学依据。

2 研究区及数据

柯本-盖格气候分类是根据降水量和近地表温度的长期特征来识别一个地区气候类型的分类方法，其分类结果与实际景观分布基本一致，被广泛使用(Zeroual等，2019；Cui等，2021；Guan等，2022；Hobbi等，2022；Zhang和Gao，2023；Malamos等，2025)。本研究以全球陆地为研究区，根据柯本-盖格气候分类将全球陆地划分为13个气候区(图1)。柯本-盖格气候分类对本研究具有以下意义：(1)不同气候区的温度变率存在显著差异，本研究采用柯本-盖格气候分区开展分区域研究，提供了气候背景约束，可以有效的揭示不同气候区极端气温变化特征的空间异质性。(2)柯本-盖格气候分区不仅是对全球气候的静态描述，其分类结果本质上反映了大尺度大气环流系统的空间分布及其相互作用。不同气候类型的形成和维持依赖于特定的大气环流背景，而大气环流异常又会进一步影响极端气候事件的频率、强度和空间格局。因此，本研究采用柯本-盖格气候分类方法划分气候区，可以更精准识别影响不同气候区极端气温变化的主导大气环流因素。

1951–2024年日尺度气温数据来自ERA5数据集(https://cds.climate.copernicus.eu/datasets)，空间分辨率为0.25°×0.25°。近年来许多学者使用该数据集开展了各项研究(张义桐等，2025；尉善凯等，2025；杨书鉴等，2025；周惜荫等，2026)，研究表明ERA5数据集相较于其他再分析数据在描述极端气温方面具有较好的精度(Yang等，2022；Hou等，2023)。88项1951–2024年逐月大气环流指数来源于国家气候中心(http://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/cn_index_130.php)。我们通过以下步骤剔除大气环流指数可能存在的时空相关性对研究结果的影响：(1)我们分别计算了88项大气环流指数之间的相关系数矩阵，以相关系数绝对值>0.7为阈值，若两个大气环流指数的相关系数超过阈值，保留其中一个，最终保留32个大气环流指数。(2)地理探测器中的自变量必须为离散型变量数据，如果自变量为连续型变量数据，软件运行时则会报错。在本研究中，大气环流指数数据为连续型变量数据，因此我们采用k均值聚类算法将大气环流指数数据离散为离散型变量数据，进而可以降低大气环流指数可能存在的时空相关性对研究结果的影响。

3 方法

3.1 极端气温指标法

本文选取了9个极端气温指数去探讨全球13个气候区极端气温事件的时空变化特征(表1)。

3.2 去趋势预置白Mann-Kendall检验法

去趋势预置白Mann-Kendall检验法(TFPW-MK)在MK检验法基础上增加了去趋势和预置白两个处理过程，有效地消除了时间序列自相关性对趋势显著性的影响，可以确保最终检验结果的精确性。

3.3 相关分析和地理探测器

Pearson相关分析是用来衡量两个随机变量之间的相关程度的一种统计方法。GDM可用于探测地理要素的空

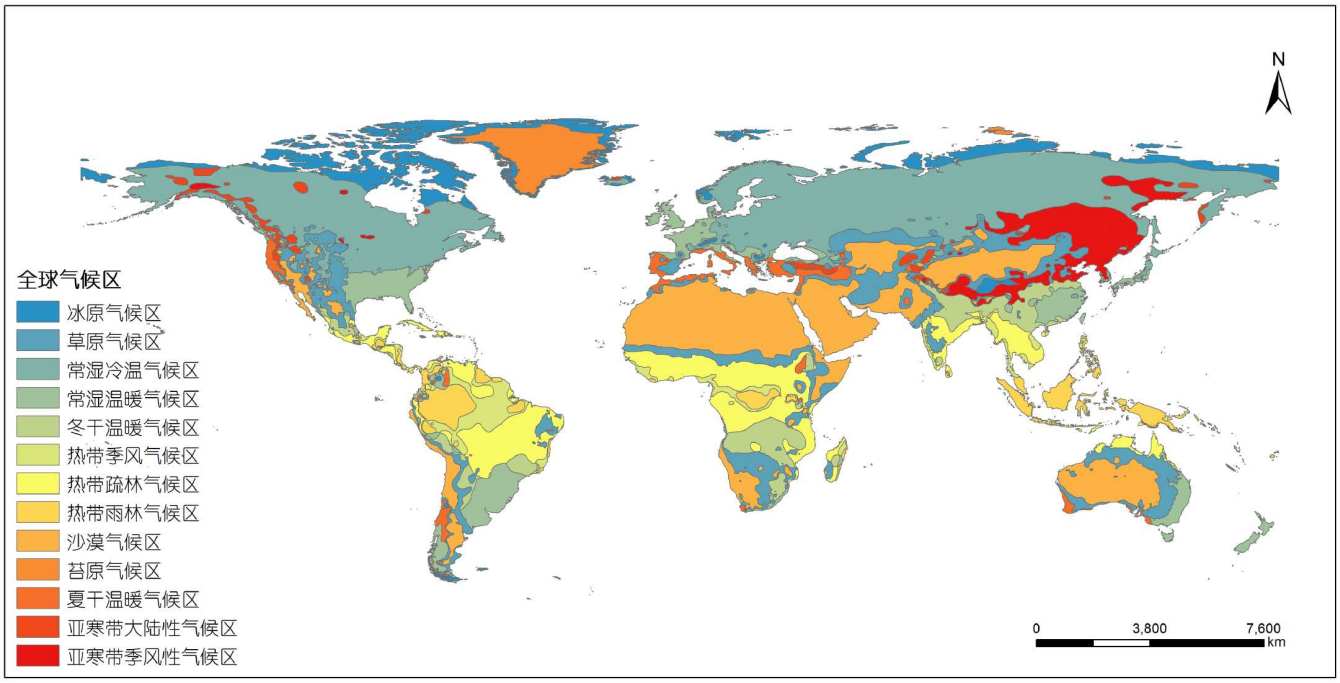


图 1　基于柯本-盖格气候分类的全球陆地13个气候区

表 1　极端气温指标

指标名称	代码	定义	单位
冷日持续日数	CSDI	每年至少连续6天日最低气温<10%分位值的日数	d
霜冻日数	FD	一年中日最低气温小于0 ℃的天数	d
结冰日数	ID	一年中日最高气温小于0 ℃的天数	d
夏天日数	SU	一年中日最高气温大于25 ℃的天数	d
热夜日数	TR	一年中日最低气温大于20 ℃的天数	d
最低气温	TNn	每月中日最低气温的最小值	℃
最低气温极大值	TNx	每月中日最低气温的最大值	℃
最高气温极小值	TXn	每月中日最高气温的最小值	℃
最高气温	TXx	每月中日最高气温的最大值	℃

间分异性，揭示其背后驱动力。本文主要使用因子探测器和交互探测器，其中因子探测器用于探测Y的空间分异性以及探测某因子X多大程度上解释了属性Y的空间分异，用q值表示，计算公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{\mathrm{SSW}}{\mathrm{SST}} \qquad (1)$$

$$\mathrm{SSW} = \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2$$

$$\mathrm{SST} = N\sigma^2$$

式中，h=1，…；L为变量Y或因子X的分层，即分类或分区；N_h和N分别为层h和全区的单元数；σ_h^2和σ^2分别是层h和全区Y值的方差。SSW和SST分别是层内方差之和及全区总方差。q值介于0–1之间，值越大说明自变量X对属性Y的解释力越强。交互作用探测器用于识别不同风险因子X_S之间的交互作用。

本文基于GDM方法的设定，即以极端气温指数为变量Y，大气环流指标为因子X，识别单一大气环流和大气环流交互作用对不同气候区极端气温事件的影响。具体而言，本研究共选取了9个极端气温指数，每一个气候区需运行9次GDM方法，故13个气候区共运行117次。以冰原气候区极端气温指数CSDI为例，设定CSDI为变量Y，影响冰原气候区的6个典型大气环流指标(北半球副高面积指数、太平洋区极涡面积指数、北美区极涡面积指数、

亚洲区极涡强度指数、北大西洋-欧洲区极涡强度指数和南极涛动指数)为因子X。运行GDM，得到单一大气环流和大气环流交互作用q值。基于单一大气环流q值识别单一大气环流对冰原气候区CSDI的影响。然后，通过比较单一大气环流q值和大气环流交互作用q值，判断大气环流交互作用是否存在非线性增强或双因子增强效应(王劲峰和徐成东，2017)。相较于传统回归模型，GDM更擅长解析复杂地理系统的多要素耦合机制，被广泛应用于多种领域(Onozuka和Hagihara，2017；Zhang X等，2020)。

4 结果与分析

4.1 极端气温的时空变化特征

采用TFPW-MK方法分析了1951–2024年全球13个气候带ETE指数的时间变化特征(表2)和全球ETE的空间变化特征(图2)。从表2可知，除冬干温暖气候区、苔原气候区和亚寒带季风性气候区外，其余气候区CSDI均呈下降趋势。13个气候区的FD、SU、TNx和TXx均表现为显著变化(p<0.01)。热带季风气候区、热带疏林气候区和热带雨林气候区的ID发生天数均为0，因此本研究对这三个气候区的ID不做讨论，其余气候区ID均表现为显著下降(p<0.01)。苔原气候区的TNn和TXn呈不显著性上升，TR变化幅度较小，其余气候区的TNn、TR和TXn均表现为显著上升(p<0.01)。总体来说，全球13个气候区均表现为冷事件下降，暖事件和极值事件上升。

从图2可知，全球大部分区域的CSDI、FD和ID都呈下降趋势，FD与ID变化特征的空间分布类似，但与CSDI有很大不同。其中CSDI在欧亚大陆很多地区都显示出上升趋势。高纬度地区如苔原气候区和冰原气候区等区域FD和ID的下降速度要小于其他区域。全球大部分区域的SU、TNn、TNx、TXn和TXx呈上升趋势。相较于低纬度地区如热带季风气候区、热带疏林气候区、热带雨林气候区等气候区，中高纬地区如常湿冷温气候区、冰原气候区、苔原气候区以及亚寒带季风性气候区等区域TNn、TNx、TXn和TXx上升速率较快，这可能是因为低纬度地区太阳辐射强，加之主要受赤道低气压和信风带控制，大气环流相对稳定，同时大部分区域分布有植被，对气温起到一定的调节和缓冲作用。沙漠气候区和草原气候区因植被较少，土壤水分欠缺，从而形成“干-热”正反馈，极端高温事件增加，TR上升速率要高于其他区域。

4.2 大气环流对极端气温的影响

分别计算得到13个气候区的9个极端气温指标与32个大气环流指数的相关系数，每个气候区按照相关系数大小分别选取了6项典型大气环流(图3，网络版附表S1)。北半球副高面积指数(NHSHA)、太平洋区极涡面积指数(PPVA)、北美区极涡面积指数(NAPVA)、亚洲区极涡强度指数(APVI)、北大西洋-欧洲区极涡强度指数(AEPV)和南极涛动指数(AAO)是影响冰原气候区极端气温事件的主要大气环流(图3A)。NHSHA增大导致西风带向高纬度偏移，减少极地冷空气扩散，冰原气候区冷事件发生频率降低。同时低纬度热量向中高纬度传输，致使该气候区的最低温度有所上升。PPVA、NAPVA、APVI和AEPV是极地高空冷性大型涡旋系统指数，对极区和高纬地区气候有明显影响。极涡面积增大会导致极涡内冷空气势力增强，更多冷空气到达该气候区，使冷事件增多。极涡强度增强会促使冷空气扩散，导致冰原气候区气温

表2 1951–2024年极端气温变化趋势[a)]

气候区	CSDI(d/a)	FD(d/a)	ID(d/a)	SU(d/a)	TNn(℃/a)	TNx(℃/a)	TR(d/a)	TXn(℃/a)	TXx(℃/a)
冰原气候区	−0.014	−0.324**	−0.291**	0.006**	0.048**	0.032**	0.0004**	0.051**	0.037**
草原气候区	−0.011	−0.135**	−0.088**	0.271**	0.021**	0.023**	0.26**	0.019**	0.025**
常湿冷温气候区	−0.004	−0.244**	−0.26**	0.129**	0.043**	0.015**	0.012**	0.051**	0.025**
常湿温暖气候区	−0.02*	−0.169**	−0.047**	0.293**	0.022**	0.019**	0.167**	0.022**	0.027**
冬干温暖气候区	0.002	−0.062**	−0.031**	0.531**	0.019**	0.02**	0.347**	0.009**	0.025**
热带季风气候区	−0.016*	−0.002**	0.000	0.237**	0.008**	0.015**	0.388**	0.012**	0.025**
热带疏林气候区	−0.009	−0.001**	0.000	0.251**	0.01**	0.018**	0.564**	0.01**	0.021**
热带雨林气候区	−0.006	−0.002**	0.000	0.266**	0.01**	0.018**	0.387**	0.011**	0.031**
沙漠气候区	−0.001	−0.077**	−0.04**	0.27**	0.024**	0.03**	0.394**	0.023**	0.024**
苔原气候区	0.007	−0.018**	−0.074**	0.0001**	0.019	0.018**	0.000	0.020	0.021**
夏干温暖气候区	−0.015	−0.18**	−0.051**	0.358**	0.024**	0.026**	0.197**	0.022**	0.023**
亚寒带大陆性气候区	−0.012	−0.327**	−0.249**	0.15**	0.044**	0.025**	0.03**	0.053**	0.029**
亚寒带季风性气候区	0.008	−0.194**	−0.245**	0.177**	0.045**	0.021**	0.045**	0.044**	0.03**

a) **代表0.01水平下显著，*代表0.05水平下显著

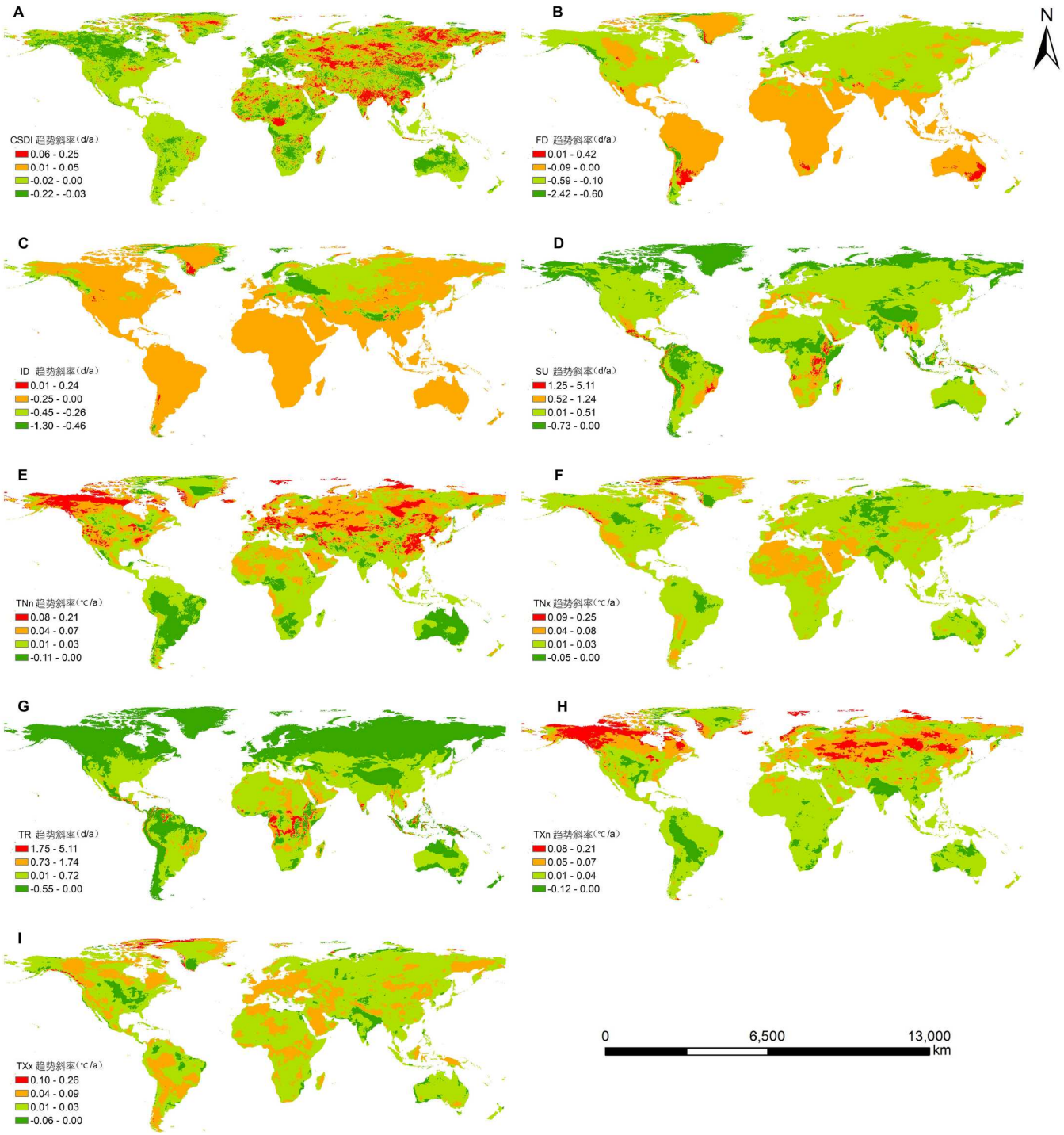


图 2　1951–2024年极端气温指标的空间变化趋势

降低，使冷事件增多。AAO会改变南北半球热量交换，当其在正相位时，可能会导致冰原气候区冷事件减少。

NHSHA、PPVA、NAPVA、APVI、AAO和850 hPa东太平洋信风指数(850EP)是影响草原气候区极端气温事件的主要大气环流(图3B)。副高面积扩大导致草原气候区气流下沉，进而压缩空气增温，同时会使低纬度热量向北输送，增加了进入草原气候区的热量，极端高温事件更易发生。极涡面积扩大可能会影响阿留申低压，引导冷空气南下，从而会影响到北美或亚洲部分草原气候区的气温。亚洲极涡强度增强导致亚洲北部冷空气通过西伯利亚高压向亚洲大陆内部的草原气候区如蒙古高原的草原区域输送，导致气温降低，冷事件增多(Zhu和

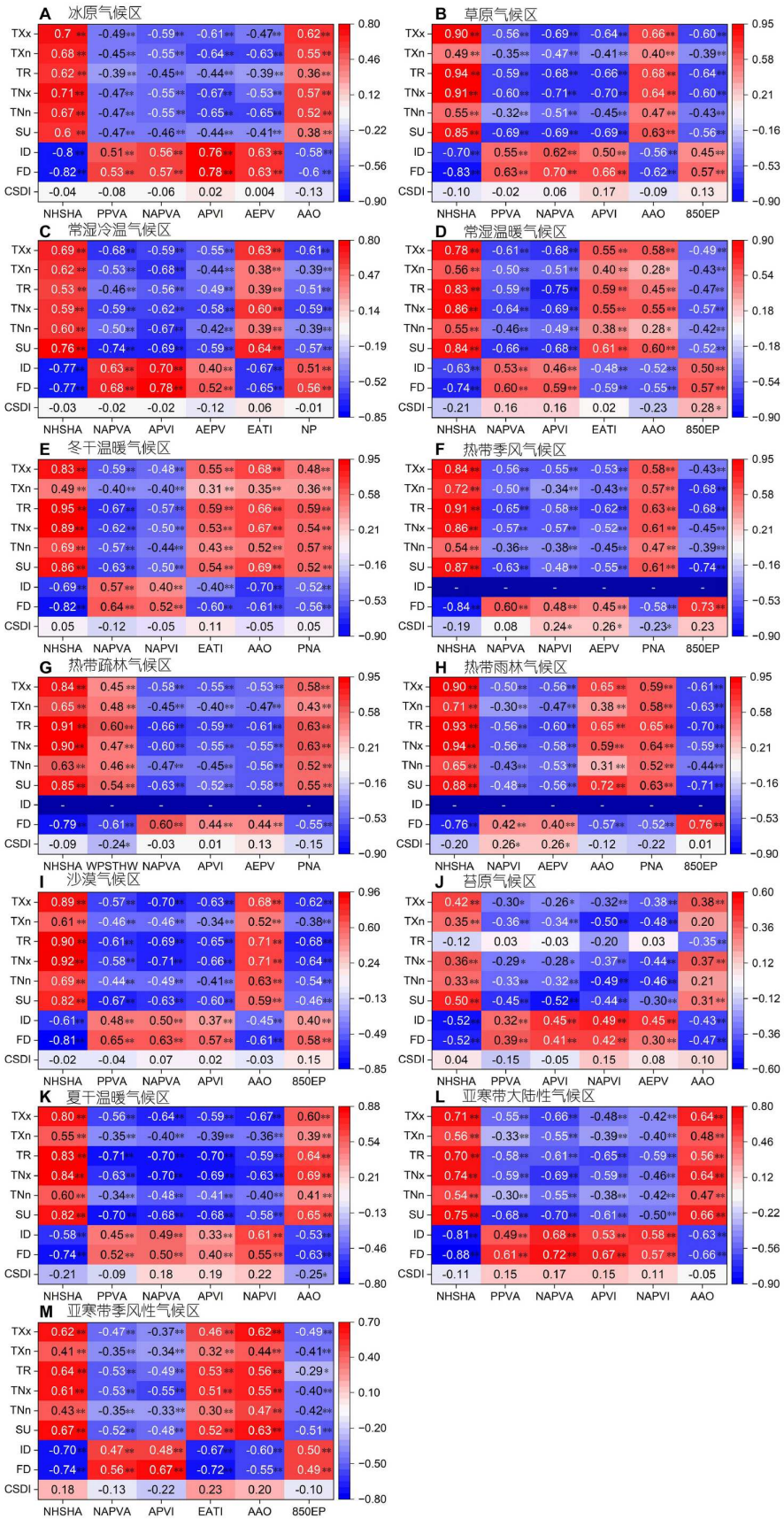


图 3　极端气温指数与大气环流指数的相关系数

Zhao，2023)。850EP主要通过影响海-气相互作用和大气环流改变气温，较强的信风会加强赤道东太平洋地区的上升气流，使海水上翻，海表温度降低，同时会导致冷空气活动增强或暖空气输送受阻，从而使冷事件增多。

NHSHA、NAPVA、APVI、AEPV、东亚槽强度指数(EATI)和北太平洋遥相关型指数(NP)是影响常湿冷温气候区极端气温事件的主要大气环流(图3C)。副高面积扩大，可能会使暖空气向中高纬度的输送增强，导致该气候区极端高温事件增多。极涡面积扩大，会加强北美地区的经向环流，使极地冷空气更易向南侵袭，导致常湿冷温气候区冷事件增多。极涡强度增强，促使冷空气向常湿冷温气候区输送，从而导致冷事件增多。NP和北美地区大气环流异常密切相关，当其处于正位相时，冷空气南下，可影响北美地区的常湿冷温气候区。

NHSHA、NAPVA、APVI、EATI、AAO和850EP是常湿温暖气候区极端气温事件的主要大气环流(图3D)。副高面积扩大导致暖空气向中高纬度的输送增强，该气候区极端高温事件增多。常湿温暖气候区一部分位于南半球中低纬度，AAO处于正相位可能会使南半球中低纬度受冷空气影响减小。北美极涡面积扩大，会加强北美地区的经向环流，进一步加强冷空气南侵，使位于北美中东部的常湿温暖气候区冷事件增加。亚洲极涡强度增加，导致冷空气可通过东亚大槽等环流系统向南输送，影响亚洲东部和中部的常湿温暖气候区。

NHSHA、NAPVA、北美区极涡强度指数(NAPVI)、EATI、AAO和太平洋-北美遥相关型指数(PNA)是影响冬干温暖气候区极端气温事件的主要大气环流(图3E)。副高面积扩大导致该气候区极端高温事件增多。北美极涡面积扩大和极涡强度增强，致使冷空气南侵，从而影响到冬干温暖气候区。AAO处于正位相，南半球副热带高压增强，改变大气环流形势，从而导致北半球中高纬度西风带增强，抑制冷空气南下，使冬干温暖气候区气温升高。

NHSHA、NAPVA、NAPVI、AEPV、PNA和850EP是影响热带季风气候区极端气温事件的主要大气环流(图3F)。副高面积扩大，使热带季风气候区受暖空气影响时间延长。PNA处于正位相，热带季风气候区受冷空气影响减小。极涡面积和强度的增加，均会使冷空气向南扩散，使热带季风气候区冷事件增加。信风增强加强导致副热带高气压带吹向赤道低气压带的水汽输送增加，在一定程度上抑制极端高温的出现。

NHSHA、西太平洋副高西伸脊点指数(WPSTHW)、NAPVA、APVI、AEPV和PNA是影响热带疏林气候区极端气温事件的主要大气环流(图3G)。副高面积扩大导致热带疏林气候区太阳辐射增强，气温升高。气候变暖致使西太平洋副高压西侧和南侧大气热源加强，从而使副高西脊点西伸，使得热带疏林气候区气温升高(孙圣杰和李栋梁，2019)。PNA处于正相位，中高纬度的冷空气不易南下，热带疏林气候区受冷空气影响减小。极涡面积和强度的增加，均会使冷空气向南扩散，使热带疏林气候区冷事件增加。

NHSHA、NAPVI、AEPV、AAO、PNA和850EP是影响热带雨林气候区极端气温事件的主要大气环流(图3H)。副高面积扩大可能会挤压赤道低气压带的范围，减少水汽输送，导致气温升高。AAO处于正位相时，冷空气被限制在极地附近，热带雨林气候区受冷空气影响减小。PNA处于正相位时，热带雨林气候区受冷空气影响减小。极涡强度增加，会使冷空气向南扩散，同时还会通过遥相关对极端气温产生影响。850EP主要通过影响热带太平洋海-气相互作用，引发ENSO事件，进而改变热带地区大气环流，影响热带雨林气候区的极端气温。

NHSHA、PPVA、NAPVA、APVI、AAO和850EP是影响沙漠气候区极端气温事件的主要大气环流(图3I)。副高范围扩大，导致沙漠气候区降水减少，太阳辐射增强，气温升高。AAO在正位相时，西风带风场增强并向南极收缩，冷空气被限制在极地附近，沙漠气候区受冷空气影响减小。极涡强度和面积的增加，均会使冷空气向南扩散，进而影响沙漠气候区气温。

NHSHA、PPVA、APVI、NAPVI、AEPV和AAO是影响苔原气候区极端气温事件的主要大气环流(图3J)。副高范围扩张，可能会挤压西风带等环流系统，使西风带位置和强度发生变化，这可能会影响极地冷气团的活动范围和路径，从而使冷气团南侵，导致苔原气候区冷事件增多。AAO会改变南北半球热量交换，当其在正相位时，会导致苔原气候区冷事件减少。极涡面积和强度会通过控制冷空气的扩散，从而影响苔原气候区极端事件的变化。

NHSHA、PPVA、NAPVA、APVI、NAPVI和AAO是影响夏干温暖气候区极端气温事件的主要大气环流(图3K)。副高面积扩大，下沉气流强盛，导致该区域降水减少，气温升高。AAO处于正位相时，南半球副热带高压增强，可能会使西风带位置和强度改变，导致该气候区气温异常。西风带增强导致夏干温暖气候区受副热带高压控制时间可能延长，极端高温事件可能增多。

NHSHA、PPVA、NAPVA、APVI、NAPVI和AAO是影响亚寒带大陆性气候区极端气温事件的主要大气环流(图3L)。副高范围扩张，会影响冷空气活动，从而影响该气候区极端气温变化。AAO处于正位相，东南太平洋

出现显著的位势高度正异常，这会抑制欧亚大陆冷空气的南下，使得亚寒带大陆气候区气温升高(张乐英等，2017)。极涡面积增加和极涡强度增强都会导致冷空气沿经向环流南下更为顺畅，从而影响该气候区极端气温变化。

NHSHA、NAPVA、APVI、EATI、AAO和850EP是影响亚寒带季风性气候区极端气温事件的主要大气环流(图3M)。副高通过影响冷暖空气的输送，改变亚寒带季风性气候区的热量平衡，进行影响其极端气温变化。AAO与东亚夏季风有密切关系(Zhu，2009)，当AAO为正位相时，使东亚夏季风增强，夏季风带来更多暖湿气流，可能使亚寒带季风性气候区夏季极端高温事件增加，冬季通过抑制冷空气南下，使亚寒带季风性气候区冬季极端低温事件减少。850EP增强，导致东太平洋海温降低，沃克环流增强，影响西风带使冷空气南下，冷事件增加。极涡面积和强度通过影响冷空气活动对亚寒带季风气候区的极端气温事件产生影响。

利用GDM量化单个大气环流因子对全球13个气候区极端气温事件的贡献率(图4)。从图4可知，NHSHA、NAPVA和APVI是影响多个气候区(冰原气候区、草原气候区、常湿冷温气候区和常湿温暖气候区)极端气温事件的主要大气环流，NHSHA、NAPVA和APVI对这些气候区极端气温事件的贡献率分别为6%–80%、6%–53%和4%–61%，这表明中高纬度气候区极端气温事件受副热带高压与极涡系统的影响较大。热带季风气候区、热带疏林气候区和热带雨林气候区的极端气温事件受NHSHA、PNA和850EP的影响较大，NHSHA、PNA和850EP对其贡献率分别为15%–79%、9%–44%和15%–57%，这也凸显了海气相互作用过程对热带地区极端气温事件变化的关键作用。NHSHA、NAPVA和AAO是影响冬干温暖气候区、沙漠气候区、夏干温暖气候区和亚寒带大陆气候区极端气温事件的关键大气环流，其贡献率分别为6%–79%、5%–57%和8%–54%。苔原气候区和亚寒带季风气候区极端气温也受AAO的影响，这表明南半球高纬度环流模态对全球极端气温异常的深远影响。WPSTHW是仅影响热带疏林气候区极端气温事件的大气环流，贡献率为18%–46%，NAPVI是仅影响苔原气候区极端气温事件的大气环流，贡献率为10%–32%，EATI是仅影响亚寒带季风性气候区极端气温事件的大气环流，贡献率为9%–47%，这些结果体现了大气环流对不同气候区极端气温事件的影响机制的差异性。

本研究采用GDM进一步分析大气环流交互作用对全球13个气候区极端气温指数的贡献率(图5和图6)。由图5和图6可知，大气环流交互作用对极端气温的贡献率要高于单个大气环流因素，这表明大气环流因子交互作用会对极端气温事件变化产生非线性增强或双因子增强效应。大气环流交互作用对ETE的最大贡献率都超过70%，这表明大气环流交互作用是影响极端气温的主导因素。

影响不同气候区极端气温事件的主导大气环流交互组合存在明显差异，特定大气环流交互组合在特定气候区极端气温事件中表现出主导作用。如极涡以及副高的交互作用对中高纬度气候区极端气温事件影响较为突出，反映了极地冷空气与副热带暖空气协同作用对极端气温的强化效应；信风、副高和遥相关指数的交互作用对低纬度气候区极端气温事件影响较为突出，这凸显了热带海洋环流与大气遥相关的协同影响。

同一气候区内不同类型极端气温事件通常由不同的环流交互组合主导，表明不同类型极端气温事件的物理形成机制存在差异。如AAO∩AEPV和PPVA∩NHSHA分别是冰原气候区的CSDI和SU的主导因素，AAO∩NAPVA是冬干温暖气候区CSDI的主导因素，NAPVA∩NHSHA是冬干温暖气候区TR的主导因素。

NHSHA、NAPVA、AAO和APVI之间的交互作用对全球气候区极端气温变化具有突出影响。如NHSHA与AAO、APVI、NAPVA等多个指数的组合是多个气候区极端气温事件(FD、ID、SU和TR)的主导因素。AAO∩APVI是冰原、草原、沙漠、亚寒带大陆性等多个气候区极端气温事件(TNn、TXn、TNx和TXx)的主导因素。APVI∩NAPVA是常湿冷温、常湿温暖等气候区极端气温事件(CSDI、TNn和TXn)的主导因素。

5 讨论

全球极端气温事件的变化特征具有明显的空间异质性，CSDI上升区域主要分布在欧亚大陆，不同气候区极端气温指数SU、TNn、TNx、TR、TXn和TXx呈显著上升趋势，FD和ID呈显著下降趋势，该变化显示出全球对气候变暖的敏感响应。冰原气候区、亚寒带大陆气候区和亚寒带季风性气候区的TNn、TNx、TXn和TXx增加速率均比全球尺度的增加速率高，与已有研究结果相似(You等，2021；沈贝蓓等，2021；Huang等，2016)。沙漠与草原气候区TR的上升速率要高于其他区域，与已有研究结果相似(侯承志等，2023)。高纬度气候区的冷事件(FD和ID)的下降速度小于其他区域，中高纬度气候区的极值指数(TNn、TNx、TXn和TXx)的增加速率比低纬度气候区高，与已有研究结果一致(王少鹏等，2010；Screen，2014；Zhang等，2019)。

大气环流是影响极端气温事件的因素之一，全球气候区位置不同，大气环流对不同气候区极端气温事件的

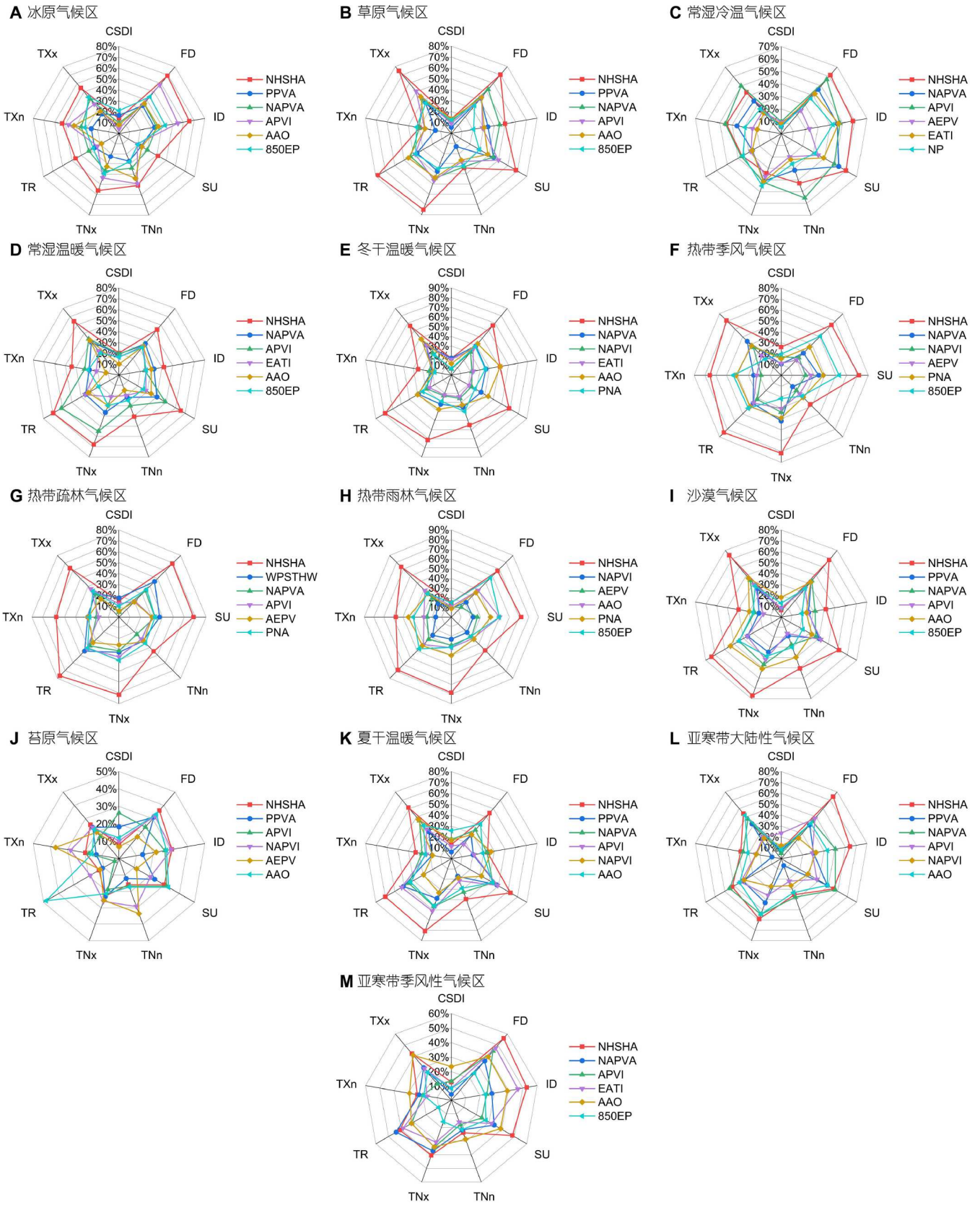


图 4　单一大气环流因子对不同极端气温指数的贡献率

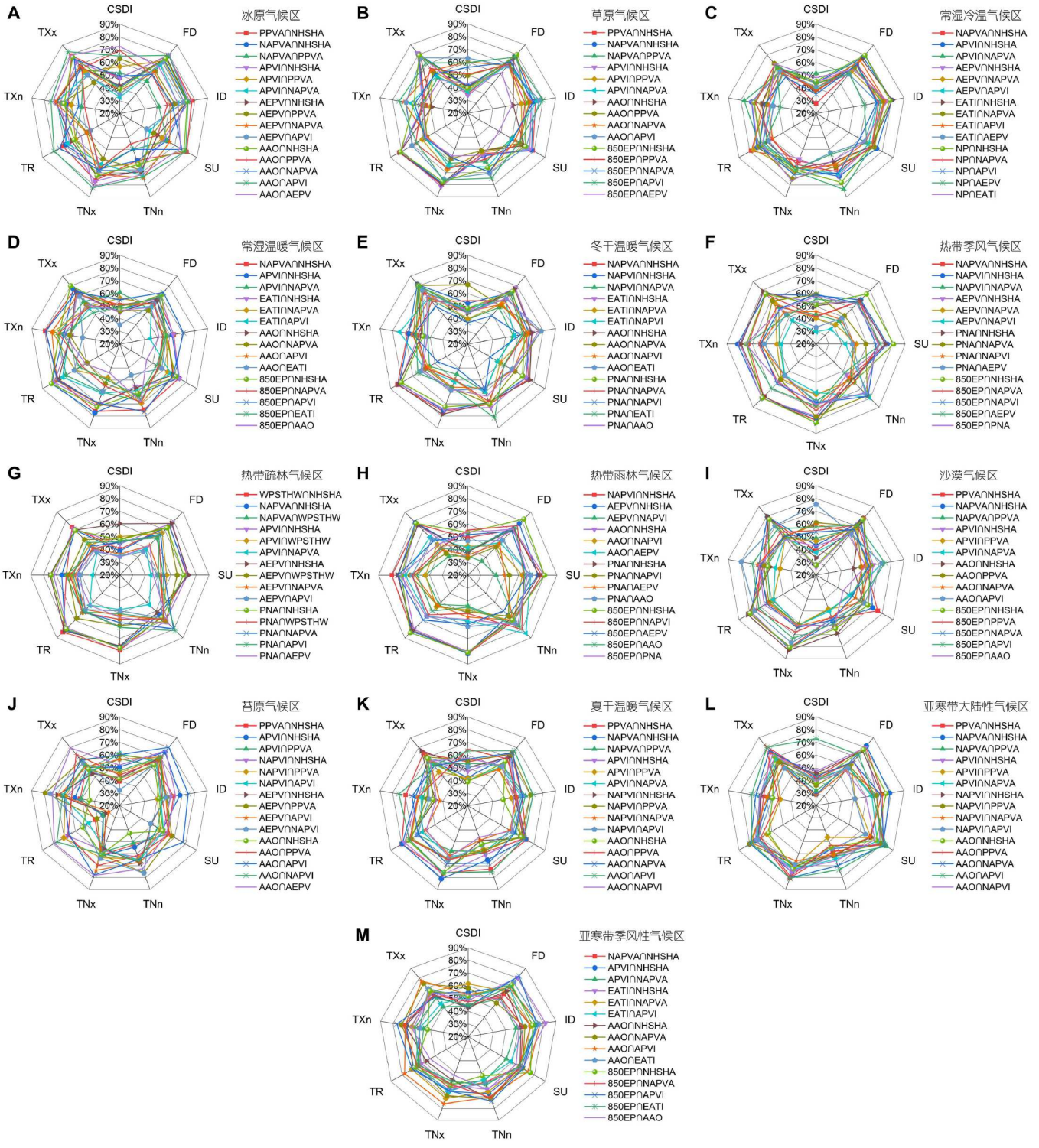


图5　大气环流交互作用对极端气温的贡献率

影响也有差异，因此本研究基于ERA5再分析数据和88种大气环流指数，通过趋势分析-相关性检验-地理探测器模型的多方法耦合框架，量化大气环流对全球13个气候区极端气温事件的影响程度。研究结果表明，NHSHA与冷指数呈负相关，极涡面积和强度指数与冷指数呈正相关，AAO与冷指数呈负相关，与暖指数呈正相关。NHSHA、极涡强度和面积以及AAO是影响各个气候区极端气温事件的主要大气环流，NHSHA对极端气温的贡献率比其他

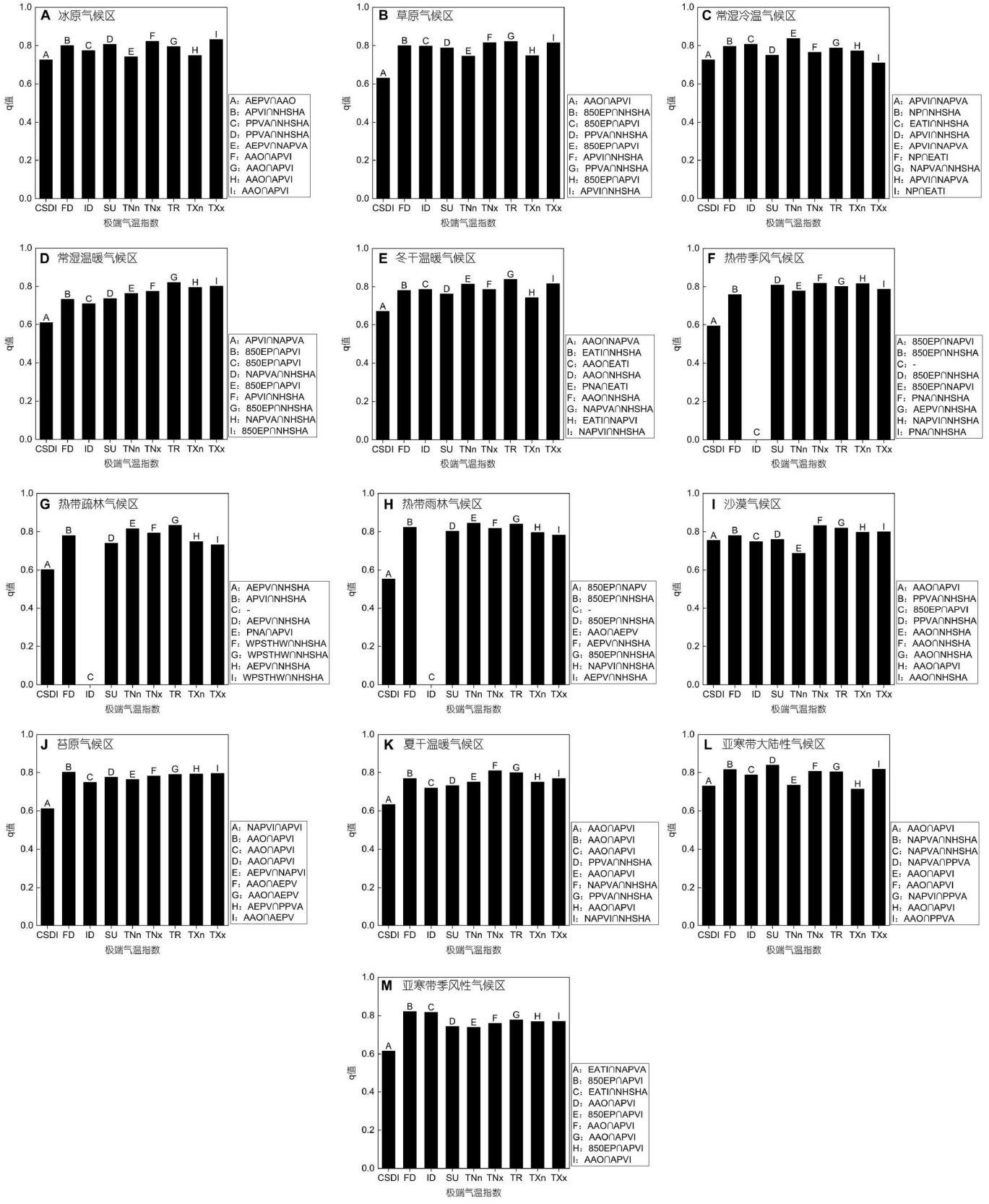


图 6　大气环流交互作用对极端气温的最大贡献率

大气环流大。PNA是影响热带雨林气候区、热带疏林气候区和热带雨林气候区的主要大气环流。

单一大气环流对极端气温事件具有较深影响，但其解释力仍有限，因此我们进一步分析了大气环流交互作用对极端气温事件影响，发现大气环流的协同效应非线性放大了它们对极端气温的影响，与已有研究相似(Hellwig和Hijmans，2017；Abdullah等，2022)。大尺度环流交互作用对极端温度事件具有跨区域的广泛影响，如NHSHA与极涡系统(APVI、NAPVA、AEPV和PPVA)、AAO或850EP的交互组合是影响多个气候区的多个极端气温事件变化(如TNx、TXx和TR等)的主导因素。极地和高纬度气候区极端气温事件多受极涡系统和NHSHA交互作用控制。热带气候区(雨林、季风、疏林)极端气温事件与PNA和NHSHA的交互作用密切相关，而中低纬度地区极端气温事件受NHSHA与850EP、AAO等的交互作用较大。同一气候区内不同类型极端事件的主导驱动因素存在本质差异，如冷事件指数常与极涡系统和涛动指数的交互关联，而暖事件指数则对副高与极涡或信风的交互更为敏感，为针对性制定不同类型极端气温事件防控策略提供了科学依据。因此，后续极端气温事件归因和预测模型构建研究中，应该优先考虑大气环流协同效应对极端气温事件的影响。但本研究结果是数据分析得到的，后续将进一步研究大气环流交互作用对极端气温事件的物理机制。

极端气温变化的空间异质性是由地理环境、大气环流和人类活动三方面因素共同驱动形成的。地理因素通过海拔热力递减(约0.6 ℃/100 m)和坡向辐射差异(阳坡比阴坡气温高)等机制塑造极端气温的空间格局。不同气候类型的形成和维持依赖于特定的环流背景，而环流异常又会进一步影响极端气候事件的频率、强度和空间格局，因此不同环流对极端气温的影响机制存在显著空间差异。人类活动通过改变地表能量平衡和局地气候背景，进一步放大或调制气温变率，如城市热岛会延长极端高温的持续时间。本研究的重心是分量化大气环流对不同气候区极端气温的影响程度，后续研究我们将尝试定量分析地理环境、大气环流和人类活动对极端气温的影响。

本文使用的极端气温指数数据是日尺度数据，而大气环流指数为月尺度数据，尽管时间分辨率不匹配，研究结果依然可信。(1)许多极端气温事件由持续性大气环流异常驱动，这些持续性大气环流通常可以维持较长时间。(2)海洋和陆面过程(如土壤湿度亏损)对极端气温事件的影响具有累积性，与月尺度大气环流的时间尺度一致。但是仍存在一些不足，月尺度大气环流指数数据可能低估快速变化的大气环流对极端气温的瞬时影响。后续研究将利用月环流指数驱动高分辨率区域气候模式，生成日尺度环流数据，进一步开展极端气温变化的大气环流驱动机制研究。

6 结论

基于ERA5再分析数据和大气环流数据，本研究分析了1951–2024年全球不同气候区极端气温时空变化及其与大气环流的关系，结果表明：(1)全球大部分区域的极端暖事件呈增长趋势，全球大部分区域的极端冷事件呈减少趋势。(2)极端气温事件的空间异质性特征显著。CSDI在欧亚大陆大部分区域呈上升趋势，高纬度的气候区FD和ID的下降速度大于其他区域，中高纬度气候区极值指数(TNn、TNx、TXn和TXx)的增加速率比低纬度地区高。(3)NHSHA、NAPVA、AAO和APVI对全球极端气温变化具有突出影响。(4)大气环流因素交互作用会对极端气温事件变化产生非线性增强或双因子增强效应，双因子协同解释力(q=0.26–0.84)较单因子(q=0.06–0.79)提升3%–67%。

补充材料 补充材料为作者提供的原始数据，作者对其学术质量和内容负责，详见网络版(http://earthcn.scichina.com)。

参考文献

侯承志, 黄丹青, 桂东伟, 等. 2023. 1961–2019年中国北方沙漠沙地极端气候变化特征及其影响因素. 地理科学, 43: 1495–1505

陆春晖, 袁佳双, 黄磊, 等. 2024. 从IPCC看全球盘点中的关键科学问题及其对中国的启示. 气候变化研究进展, 20: 736–746

沈贝蓓, 宋帅峰, 张丽娟, 等. 2021. 1981–2019年全球气温变化特征. 地理学报, 76: 2660–2672

孙圣杰, 李栋梁. 2019. 气候变暖背景下西太平洋副热带高压体形态变异及热力原因. 气象学报, 77: 100–110

王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 72: 116–134

王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 2013. 1962–2011年长江流域极端气温事件分析. 地理学报, 68: 611–625

王少鹏, 王志恒, 朴世龙, 等. 2010. 我国40年来增温时间存在显著的区域差异. 科学通报, 55: 1538–1543

尉善凯, 李湘怡, 王锴, 等. 2025. 2001–2023年中国植被持续变绿. 中国科学: 地球科学, 55: 1099–1108

杨书鉴, 牛健植, 苗禹博, 等. 2025. 中国植被覆盖对极端气候的响应. 水土保持研究, 32: 138–146

杨阳, 赵娜, 岳天祥. 2022. 1980–2018年中国极端高温事件时空格局演变特征. 地理科学, 42: 536–547

翟盘茂, 刘静. 2012. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾. 中国工程科学, 14: 55–63

张乐英, 徐海明, 施宁. 2017. 冬季南极涛动对欧亚大陆地表气温的影响. 大气科学, 41: 869–881

张仪辉, 梁康, 刘昌明, 等. 2022. 尼洋河流域极端气候时空分布特征及其可能成因. 地理研究, 41: 2808–2820

张义桐, 郝增超, 陈阳, 等. 2025. 全球多时间尺度复合高温干旱增加. 中国科学: 地球科学, 55: 3321–3332

周惜荫, 高晓清, 左洪超, 等. 2026. 1979–2021年中国典型城市群地面热

源变化特征及其对复合高温的影响. 中国科学: 地球科学, 56: 267–280
Abadi B, Gebre H, Walelign W, et al. 2020. Trends in extreme temperature and rainfall indices in the semi-arid areas of Western Tigray, Ethiopia. Environ Syst Res, 9: 3
Abdullah S, Adnan M S G, Barua D, et al. 2022. Urban green and blue space changes: A spatiotemporal evaluation of impacts on ecosystem service value in Bangladesh. Ecol Inf, 70: 101730
Adams R E, Lee C C, Smith E T, et al. 2021. The relationship between atmospheric circulation patterns and extreme temperature events in North America. Intl J Climatol, 41: 92–103
Alexander L V, Arblaster J M. 2017. Historical and projected trends in temperature and precipitation extremes in Australia in observations and CMIP5. Weather Clim Extrem, 15: 34–56
Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. J Geophys Res, 111: 2005JD006290
Andrade C, Leite S M, Santos J A. 2012. Temperature extremes in Europe: Overview of their driving atmospheric patterns. Nat Hazards Earth Syst Sci, 12: 1671–1691
Bieniek P A, Walsh J E. 2017. Atmospheric circulation patterns associated with monthly and daily temperature and precipitation extremes in Alaska. Intl J Climatol, 37: 208–217
Chen S, Fan Y, Zhou B. 2025. Decadal variation of late summer extreme temperatures in Eastern China and the influence from the North Atlantic. Atmos Res, 322: 108134
Choi G, Collins D, Ren G, et al. 2009. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955–2007. Intl J Climatol, 29: 1906–1925
Cui D, Liang S, Wang D, et al. 2021. A 1 km global dataset of historical (1979–2013) and future (2020–2100) Köppen-Geiger climate classification and bioclimatic variables. Earth Syst Sci Data, 13: 5087–5114
Donat M G, Alexander L V, Yang H, et al. 2013. Global land-based datasets for monitoring climatic extremes. Bull Am Meteorol Soc, 94: 997–1006
Dong Z, Yang R, Cao J, et al. 2023. A strong high-temperature event in late-spring 2023 in Yunnan province, Southwest China: Characteristics and possible causes. Atmos Res, 295: 107017
Feng R, Yu R, Zheng H, et al. 2018. Spatial and temporal variations in extreme temperature in Central Asia. Intl J Climatol, 38: e388–e400
Gao W, Duan K, Li S. 2021. A spatial-temporal analysis of cold surge days in northern China during 1960–2016. Nat Hazards, 108: 147–162
Guan Y, Liu J, Wang K, et al. 2022. From a spatial structure perspective: Spatial-temporal variation of climate redistribution of China based on the Köppen-Geiger classification. Geophys Res Lett, 49: e2022GL099319
He S, Wang H. 2015. Linkage between the east Asian January temperature extremes and the preceding Arctic Oscillation. Int J Climatol, 36: 1026–1032
Hellwig E, Hijmans R J. 2017. Spatio-temporal variation in childhood growth in Nigeria: A comparison of aggregation and interpolation. Int J Digital Earth, 10: 1166–1176
Hobbi S, Michael Papalexiou S, Rupa Rajulapati C, et al. 2022. Detailed investigation of discrepancies in Köppen-Geiger climate classification using seven global gridded products. J Hydrol, 612: 128121
Horton D E, Johnson N C, Singh D, et al. 2015. Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends. Nature, 522: 465–469
Hou C, Huang D, Xu H, et al. 2023. Evaluation of ERA5 reanalysis over the deserts in northern China. Theor Appl Climatol, 151: 801–816
Huang J, Yu H, Guan X, et al. 2016. Accelerated dryland expansion under climate change. Nat Clim Change, 6: 166–171
Huang J, Hitchcock P, Maycock A C, et al. 2021. Northern hemisphere cold air outbreaks are more likely to be severe during weak polar vortex conditions. Commun Earth Environ, 2: 147
Huang Z, Huang Y, Yin Z, et al. 2025. Subseasonal reversal of extreme cold temperature frequencies in northeast China: Possible mechanism and prediction. J Geophys Res Atmos, 130: e2024JD042556
Kothawale D R, Revadekar J V, Rupa Kumar K. 2010. Recent trends in pre-monsoon daily temperature extremes over India. J Earth Syst Sci, 119: 51–65
Li J, Dong W J, Yan Z W. 2012. Changes of climate extremes of temperature and precipitation in summer in eastern China associated with changes in atmospheric circulation in East Asia during 1960–2008. Chin Sci Bull, 57: 1856–1861
Li J, Xu K, Chen Y, et al. 2025. Interaction of 25–60-day intraseasonal variabilities between subtropical and polar regions nonlinearly amplifies and prolongs the extreme temperature over Northeast China. Geophys Res Lett, 52: e2025GL116758
Li X, Sun J. 2025. Atmospheric circulation patterns conducive to summer extreme temperature, precipitation, and vapor pressure deficit events over Northeast China. J Clim, 38: 835–853
Loikith P C, Broccoli A J. 2012. Characteristics of observed atmospheric circulation patterns associated with temperature extremes over North America. J Clim, 25: 7266–7281
Loikith P C, Broccoli A J. 2015. Comparison between observed and model-simulated atmospheric circulation patterns associated with extreme temperature days over North America using CMIP5 historical simulations. J Clim, 28: 2063–2079
Luo Y, Zhou Y, Zhou C. 2024. Spatio-temporal patterns of temperature extremes and their response to atmospheric circulation factors in China from 1961 to 2020. J Geogr Sci, 34: 1883–1903
Malamos N, Tegos A, Bourantas G, et al. 2025. Global reference evapotranspiration clustering and its relation to the Köppen-Geiger climate classification. J Hydrol, 660: 133342
Olmo M, Bettolli M L, Rusticucci M. 2020. Atmospheric circulation influence on temperature and precipitation individual and compound daily extreme events: Spatial variability and trends over southern South America. Weather Clim Extrem, 29: 100267
Onozuka D, Hagihara A. 2017. Extreme temperature and out-of-hospital cardiac arrest in Japan: A nationwide, retrospective, observational study. Sci Total Environ, 575: 258–264
Rashid I U, Almazroui M, Saeed S, et al. 2020. Analysis of extreme summer temperatures in Saudi Arabia and the association with large-scale atmospheric circulation. Atmos Res, 231: 104659
Screen J A. 2014. Arctic amplification decreases temperature variance in northern mid- to high-latitudes. Nat Clim Change, 4: 577–582
Tong S, Li X, Zhang J, et al. 2019. Spatial and temporal variability in extreme temperature and precipitation events in Inner Mongolia (China) during 1960–2017. Sci Total Environ, 649: 75–89
Uckan Y, Ruiz-Vásquez M, De Polt K, et al. 2025. Global relevance of atmospheric and land surface drivers for hot temperature extremes. Earth Syst Dynam, 16: 869–889
van Westen R M, Baatsen M L J. 2025. European temperature extremes under different AMOC scenarios in the community earth system model. Geophys Res Lett, 52: e2025GL114611
Wang M, Wu Y, Du J, et al. 2025. Spatiotemporal evolution of temperature extremes onset times and their association with atmospheric circulations in the Poyang Lake basin, China. Int J Biometeorol, 69: 1443–1457
Xu Z, Cheng J, Hu W, et al. 2018. Heatwave and health events: A systematic evaluation of different temperature indicators, heatwave intensities and durations. Sci Total Environ, 630: 679–689
Yang Y, Li Q, Song Z, et al. 2022. A comparison of global surface temperature variability, extremes and warming trend using reanalysis datasets and CMST-Interim. Intl J Climatol, 42: 5609–5628

You Q, Cai Z, Pepin N, et al. 2021. Warming amplification over the Arctic Pole and Third Pole: Trends, mechanisms and consequences. Earth-Sci Rev, 217: 103625

Yu L, Sui C, Lenschow D H, et al. 2017. The relationship between wintertime extreme temperature events north of 60°N and large-scale atmospheric circulations. Intl J Climatol, 37: 597–611

Zeroual A, Assani A A, Meddi M, et al. 2019. Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen-Geiger climate classification scheme. Clim Dyn, 52: 227–243

Zhang K, Dai S, Dong X. 2020. Dynamic variability in daily temperature extremes and their relationships with large-scale atmospheric circulation during 1960–2015 in Xinjiang, China. Chin Geogr Sci, 30: 233–248

Zhang L, Liu Y, Jin M, et al. 2023. Spatiotemporal variability in extreme temperature events in an arid-semiarid region of China and their teleconnections with large-scale atmospheric circulation. J Earth Sci, 34: 1201–1217

Zhang M, Gao Y. 2023. Time of emergence in climate extremes corresponding to Köppen-Geiger classification. Weather Clim Extrem, 41: 100593

Zhang P, Ren G, Xu Y, et al. 2019. Observed changes in extreme temperature over the global land based on a newly developed station daily dataset. J Clim, 32: 8489–8509

Zhang X X, Xu C D, Xiao G X. 2020. Spatial heterogeneity of the association between temperature and hand, foot, and mouth disease risk in metropolitan and other areas. Sci Total Environ, 713: 136623

Zhong K, Zheng F, Wu H, et al. 2017. Dynamic changes in temperature extremes and their association with atmospheric circulation patterns in the Songhua River Basin, China. Atmos Res, 190: 77–88

Zhou B, Xu Y, Wu J, et al. 2016. Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: Analysis of a high-resolution grid dataset. Intl J Climatol, 36: 1051–1066

Zhu G, Zhao X. 2023. Changes of extreme climate indices on the Mongolian Plateau during 1981–2020 based on ERA5 reanalysis. Theor Appl Climatol, 154: 467–482

Zhu Y. 2009. The Antarctic oscillation-East Asian summer monsoon connections in NCEP-1 and ERA-40. Adv Atmos Sci, 26: 707–716

（责任编委：吕健）