

## 1995-2024 年京津冀城市群极端气候时空变化特征

杨 阳\*, 谭 磊, 杨晓辉, 张 硕

北京市市政工程研究院 北京

**【摘要】**本研究基于气象数据,综合利用热点分析、M-K 突变检验等地理学和统计学方法,模拟了 1995-2024 年期间京津冀城市群极端气候的时空演变特征。结果表明:在时间上,极端高温与降雨天数显著增加,且极端降雨在 2010 年后发生突变,复杂性增强;极端低温与干旱则呈波动变化。在空间上,气候风险呈现南北分异:北部是极端低温与降雨的敏感区,南部则更易遭受极端高温与干旱侵袭。这些变化是全球变暖大背景与京津冀城市群快速城市化共同作用的结果,凸显了该区域面临的气候风险正持续加剧,本研究为制定差异化的城市气候适应策略提供了科学依据。

**【关键词】**京津冀城市群; 极端气候; 时空变化

**【收稿日期】**2025 年 11 月 9 日      **【出刊日期】**2025 年 12 月 18 日      **【DOI】**10.12208/j.aes.20250023

### Spatiotemporal variation characteristics of extreme climate in the Beijing Tianjin Hebei urban agglomeration from 1995 to 2024

Yang Yang\*, Lei Tan, Xiaohui Yang, Shuo Zhang

Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing

**【Abstract】** This study utilizes meteorological data and integrates geographical and statistical methods such as hotspot analysis and the M-K mutation test to simulate the spatiotemporal evolution characteristics of extreme climate in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 1995 to 2024. The results indicate that: temporally, extreme high temperatures and rainy days have significantly increased, with extreme rainfall exhibiting a mutation after 2010 and enhanced complexity, while extreme low temperatures and droughts show fluctuating patterns. Spatially, climate risks exhibit a north-south divergence: the northern region is a sensitive area for extreme low temperatures and rainfall, whereas the southern region is more vulnerable to extreme high temperatures and droughts. These changes result from the combined effects of global warming and rapid urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei region, highlighting the escalating climate risks faced by the area. This study provides a scientific basis for formulating differentiated urban climate adaptation strategies.

**【Keywords】** Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration; Extreme climate; Spatiotemporal variation

气候变化作为 21 世纪人类社会生存与发展所面临的最严峻、最普适性的挑战之一,其影响已从科学预测演变为切身的现实体验。政府间气候变化专门委员会(IPCC)历次评估报告均以确凿的证据表明,全球气候系统正经历着以变暖为主要特征的深刻变革,而这一变革最直接、最剧烈的表现形式,便是极端气候事件的频率、强度与持续时间的显著

变化<sup>[1]</sup>。热浪、干旱、暴雨、洪涝、寒潮等极端天气气候事件不再是偶发的新闻标题,而是日益频繁地冲击着全球各地的生态系统、社会经济结构与人民生命财产安全<sup>[2,3]</sup>。世界气象组织(WMO)发布的《全球气候状况报告》持续警示,全球气温纪录屡被刷新,伴随而来的是破纪录的降雨、毁灭性的林火与不断增强的热带气旋,其对农业产量、水资源安全、

\*通讯作者: 杨阳

能源供应、公共卫生以及关键基础设施的破坏力呈指数级增长。这些极端事件不仅造成了数千亿美元的直接经济损失,更通过复杂的连锁效应,深刻侵蚀着人类社会可持续发展的根基。例如,极端热浪加剧了城市热岛效应,导致居民死亡率攀升与劳动生产率下降;特大暴雨引发的城市内涝则暴露了城市基础设施的脆弱性,威胁数百万人的日常生活;而持续的干旱则可能引发区域性水资源危机与粮食安全危机,甚至成为社会动荡与人口迁移的潜在诱因。因此,深入理解极端气候的演变规律,精准模拟其时空变化特征,已远远超出了纯粹学术探索的范畴,它成为了各国政府制定适应性战略、提升灾害风险管理能力、保障国土生态安全、乃至实现联合国 2030 年可持续发展目标 (SDGs) 的迫切科学需求。对极端气候进行精细化、量化的诊断与研究,是构建气候韧性社会、迈向人与自然和谐共生的现代化进程中不可或缺的科学基石。

在中国波澜壮阔的现代化征程中,城市群作为支撑经济增长、促进区域协调、参与国际竞争的核心载体,扮演着至关重要的角色。其中,京津冀城市群以其独特的战略地位,成为中国北方经济规模最大、创新能力最强、人口集聚度最高的核心区域。该区域被赋予了“引领中国北方经济发展、优化国家区域发展格局”的重大历史使命,以全国 2.3% 的国土面积,承载了约 8% 的人口,贡献了超过 10% 的国内生产总值,城市化水平已突破 70%,是中国政治“心脏”、文化瑰库与国际交往的重要门户。然而,与高速城市化、高密度人口和高度发达的经济活动相伴而生的,是前所未有的资源环境压力与复杂的气候风险。京津冀地区地处半湿润向半干旱过渡的生态脆弱带,本身对气候变化就具有高度的敏感性。近年来,在全球变暖和快速城市化的双重胁迫下,该区域正日益成为极端气候事件侵袭的“重灾区”。一系列极端天气案例触目惊心:2012 年“7·21”北京特大暴雨引发严重城市内涝,造成巨大生命财产损失;2023 年盛夏,京津冀地区遭遇破历史极值的持续极端高温热浪,对电力供应与公众健康构成严峻考验;与此同时,阶段性、局地性的极端强对流天气也呈增多趋势,短时强降水、冰雹、雷暴大风等“城市看海”现象频现。这些极端事件不仅直接冲击着区域交通网络、能源设施和建成环境,更通过影响水资源供需平衡(如加剧海河流域水资源短缺)、

威胁粮食安全(如影响华北平原农业生产)、恶化空气质量等复合型路径,对京津冀世界级城市群的高质量发展蓝图构成了实质性威胁。因此,系统揭示京津冀城市群极端气候的时空演变规律,不仅是对全球气候变化区域响应的科学回应,更是关乎该区域能否顺利实现产业转型升级、空间结构优化、生态环境根本改善等协同发展目标,科学制定与资源环境承载力相适应的人口、产业与空间政策的重大战略课题。

面对京津冀城市群日益严峻的极端气候风险,学术界已开展了大量卓有成效的研究工作。既往研究多基于气象站点观测数据或再分析资料,从区域整体尺度或自然地理单元(如流域、生态功能区)出发,对气温、降水等常规气候要素或少数极端指数的趋势进行了分析。这些研究为我们理解区域气候变化的宏观态势提供了宝贵的知识基础。然而,以城市为基本单元的行政尺度分析常常被忽视或弱化。城市,作为人类活动最集中、社会经济功能最完整的空间实体,是制定和实施气候变化适应与减灾防灾政策的最终执行单元。区域尺度的平均化结论,往往掩盖了城市个体之间的差异性。因此,将研究尺度精细化到以地级市为单位的行政边界,能够更真实地反映极端气候影响的“属地化”特征,其研究成果也更能被地方政府和决策部门直接理解与应用,从而实现科学研究与治理需求的精准对接。鉴于此,本研究聚焦于 1995-2024 年这一关键时期(这一时期涵盖了京津冀城市化进程最为迅猛的三十年),综合运用多种时空分析技术对该城市群极端气候的时空变化特征进行系统性分析。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区概况

如图 1 所示,京津冀城市群地处中国华北地区(位于东经  $113^{\circ}27'$ ~ $119^{\circ}50'$ ,北纬  $36^{\circ}05'$ ~ $42^{\circ}40'$ 之间),作为引领中国北方经济发展的核心区域,其自然地理环境独特,社会经济地位举足轻重。本研究的区域范围涵盖北京市、天津市以及河北省下辖的石家庄、唐山、秦皇岛、保定、张家口、承德、沧州、廊坊、邢台、邯郸、衡水 11 个地级市,共计 13 个城市。其地貌和气候的过渡性、脆弱性,叠加快速城市化的人类活动影响,使得探究该区域极端气候的演变规律对于保障区域安全、指导可持续发展具有尤为紧迫的现实意义。



图 1 研究区示意图

### 1.2 数据来源

本研究所采用气象数据源自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>)，该平台是中国气象局面向国内外科研用户提供权威气象资料的核心官方门户。该网站所提供的地面气象台站观测数据，通过覆盖全国的高密度气象观测网络采集、录入并经过系统性质控后发布。这些数据以其高度的权威性、规范的处理流程和长期的连续性，在全球气候监测与研究领域享有盛誉，已被广泛应用于国内外众多高水平的气候变化研究中，其科学价值与实践可靠性得到了学术界的普遍认可。

京津冀地区共有 174 个国家级气象站点，为确保每个站点的数据在时间序列上具有可比性，我们设定了严格的数据完整性标准。仅保留在研究时段内数据缺失率低于 5% 的站点，对于个别日值的随机缺失，则采用邻近站点回归插值或气候平均法进行填补，以确保序列的连续。长期气象序列可能因台站迁移、观测仪器更换或周围环境变化而产生非气候性突变（不均一性）。为此，我们采用了国际上通用的均一性检验方法对气候因子序列进行了检测与订正，有效剔除了非自然因素造成的“伪突变”，确保了气候趋势分析的真实性。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 极端气候指数的选取

为科学量化京津冀城市群极端气候事件的时空

变化特征，本研究摒弃了基于固定绝对阈值的传统定义方法，转而采用目前被“气候变化检测与指数专家组（ETCCDI）”广泛推荐并应用于全球及区域尺度研究的百分位阈值法来定义和计算四个核心极端气候指数。该方法的核心思想在于，基于研究时段内每个气象站点自身观测数据的概率分布来确定极端事件的阈值，从而能够更为灵敏、客观地捕捉到当地气候状况的异常程度。我们将一年中日平均气温的第百分之 90 和第百分之 10 分位数作为阈值，将日均气温高于（低于）该阈值的天数定义为极端高温/低温天数；同样的，将一年中日降水量的第百分之 90 和第百分之 10 分位数作为阈值，将日降水量高于（低于）该阈值的天数定义为极端降雨/干旱天数。

#### 1.3.2 Mann-Kendall 突变检验

为了精确探测京津冀城市群极端气候指数时间序列中可能存在的显著性趋势转折点（即突变点），本研究采用了世界气象组织（WMO）推荐并广泛应用于水文气候序列分析的曼-肯德尔（Mann-Kendall）突变检验法<sup>[4,5]</sup>。该方法作为一种非参数的统计检验技术，其核心优势在于无需样本遵从特定的概率分布（如正态分布），对异常值亦不敏感，因而特别适用于检验气候要素这类通常不严格服从正态分布的数据序列<sup>[6]</sup>。

#### 1.3.3 热点分析

为深入揭示京津冀城市群极端气候指数在空间

上的集聚规律与分异特征, 识别具有统计显著性的高值簇与低值簇区域, 本研究采用了热点分析对四个极端气候指数的空间格局进行了精确探测与可视化。热点分析并非简单的空间分布描述, 而是一种基于局部空间自相关理论的统计方法, 该方法的基本原理在于, 通过计算每个地理单元(本研究中的各个城市)及其邻近单元的属性值, 来判别该单元在全局空间格局中所处的状态。该方法超越了人眼对地图的主观判读, 通过严格的统计显著性检验, 将随机分布与真实的集聚模式区分开来, 确保了研究结论的科学性与可靠性。能够精准定位极端气候事件的高发区(热点)和低发区(冷点), 深刻揭示了气候风险在空间上的分布特征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 时间变化特征

京津冀地区四种极端气候指数的时序变化情况如图 2 所示。北京市, 天津市, 河北省的极端低温天数呈现出相似的变化趋势, 整体范围在 10~90 天之间波动, 在 2012 年达到了峰值。极端高温天数展现出了较为显著的增加趋势, 整体范围在 20~90 天之间波动, 2019 年附近达到了最大值(见图 2b)。

极端降雨天数的整体范围在 0~80 天之间, 在 2010 年之后, 北京市, 天津市和河北省的指数值明显增加。北京市, 天津市和河北省的极端干旱天数在 0~60 天之间波动, 没有明显的变化趋势, 在 2020 年京津冀地区的干旱情况较为严重。

为进一步研究该区域极端气候的时间变化特征, 采用 M-K 突变检验对 4 种极端气候指数进行了检验(见图 3~5)。对于北京市(见图 3), 可以看到在置信区间内, 极端低温日数, 极端干旱日数出现了多个交点, 表明这两个指数在过去近 30 年期间发生多次突变, 极端降雨日数的突变时间集中在 2010 年之后, 表明 2010 年后极端降雨天数的变化较之前更为复杂, 极端高温天数的突变时间出现在 2014 年。

对于天津市的极端气候而言(见图 4), 极端低温天数在过去 30 年内出现多次突变, 而极端高温天数, 极端降雨天数, 极端干旱天数均出现一次突变, 突变的年份分别为 2014 年, 2021 年和 2005 年。

对于河北省而言(见图 5), 极端低温天数和极端干旱天数在过去 30 年内均发生多次突变, 极端高温天数在 2003 年和 2022 年发生突变, 极端降雨天数在 2006 年附件发生突变。

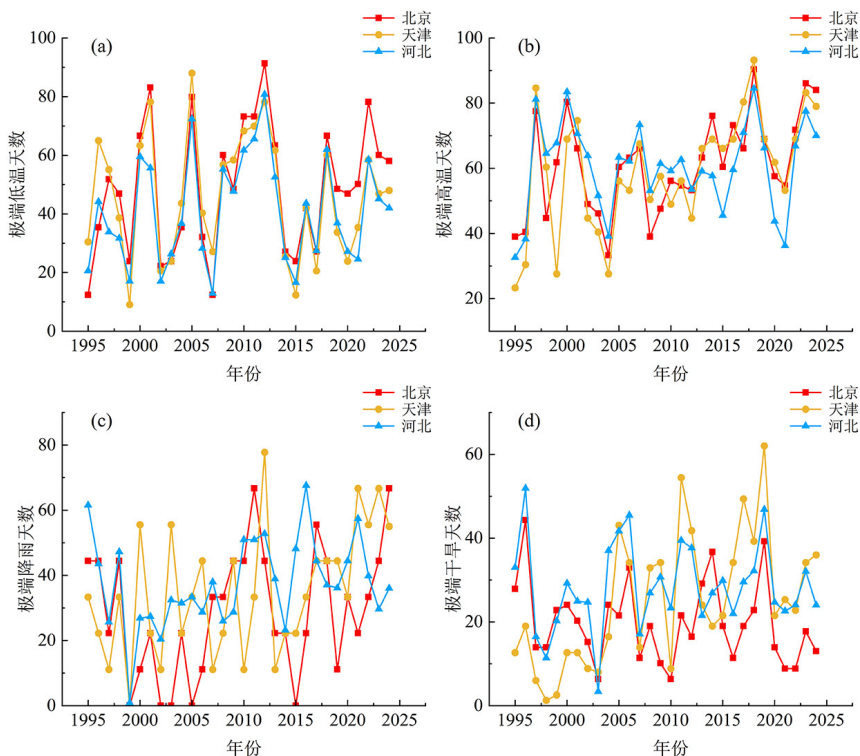


图 2 1995-2024 年京津冀地区极端气候变化情况

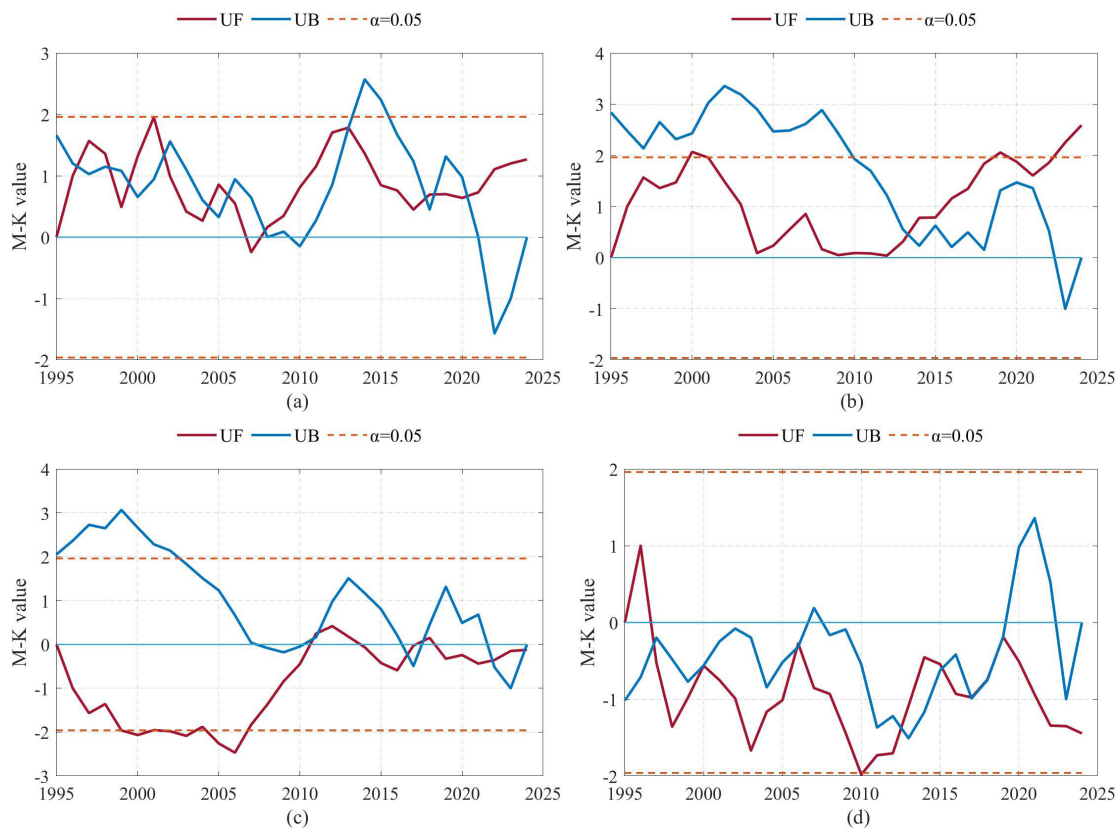


图3 北京市极端气候指数突变情况 (a 为极端低温天数, b 为极端高温天数, c 为极端降雨天数, d 为极端干旱天数)



图4 天津市极端气候指数突变情况 (a 为极端低温天数, b 为极端高温天数, c 为极端降雨天数, d 为极端干旱天数)



图5 河北省极端气候突变情况 (a 为极端低温天数, b 为极端高温天数, c 为极端降雨天数, d 为极端干旱天数)

## 2.2 空间变化特征

我们使用热点分析法对过去 30 年来京津冀地区极端气候指数在空间上的分布特征进行了分析, 结果如图 6 所示。研究发现, 极端低温天数的热点区域 (高值地区) 主要出现在京津冀城市群北部, 主要集中在承德和北京这两个城市, 北京最为显著; 该指数的冷点区域, 主要分布在城市群南部, 主要集中在衡水和邢台两个城市, 邢台最为显著。极端高温天数的热点区域不显著, 冷点区域主要体现在邯郸市。极端降雨天数的热点区域主要分布在城市群南部, 主要集中在邢台市和邯郸市, 冷点区域主要分布在廊坊市。极端干旱天数的热点区域和冷点区域分布面积最广, 涉及的城市最多。该指数的高值聚集区主要集中在城市群的南部, 包括石家庄, 衡水, 邢台和邯郸四个城市, 低值聚集区主要分布在城市群的北部, 主要包括承德, 北京和唐山三个城市, 北京市的冷点效应最为显著。

图 7 展示了过去 30 年来京津冀城市群极端气候指数的变化率。极端低温天数呈现增长趋势的区域主要在城市群的北部和南部, 保定市的极端低温天数增长最快, 速率达到了 0.44 天/年, 而城市群东部区域的极端低温天数出现减少的趋势, 减少速率最高可达 0.13 天/年。极端高温天数变化率的分布格局与极端低温天数相反, 在城市群北部, 该指数呈现出减少趋势, 减少的速率最高可达 0.18 天/年, 增长速率最快的区域出现在天津市, 速率为 0.68 天/年。极端降雨天数在城市群大部分地区均表现出了上升的趋势, 上升最快的区域位于城市群中部, 出现在保定, 廊坊和天津市, 上升速率最快为 0.57 天/年, 呈现下降趋势的地区位于城市群的东部, 为秦皇岛和唐山两市, 秦皇岛市的下降速率最快, 为 0.44 天/年。极端干旱天数呈现增长的地区主要分布在城市群南部, 最高速率可达 0.78 天/年; 而在城市群的中部和西部出现减少趋势, 减少速率最快的地区为北京市, 速率可达 0.18 天/年。

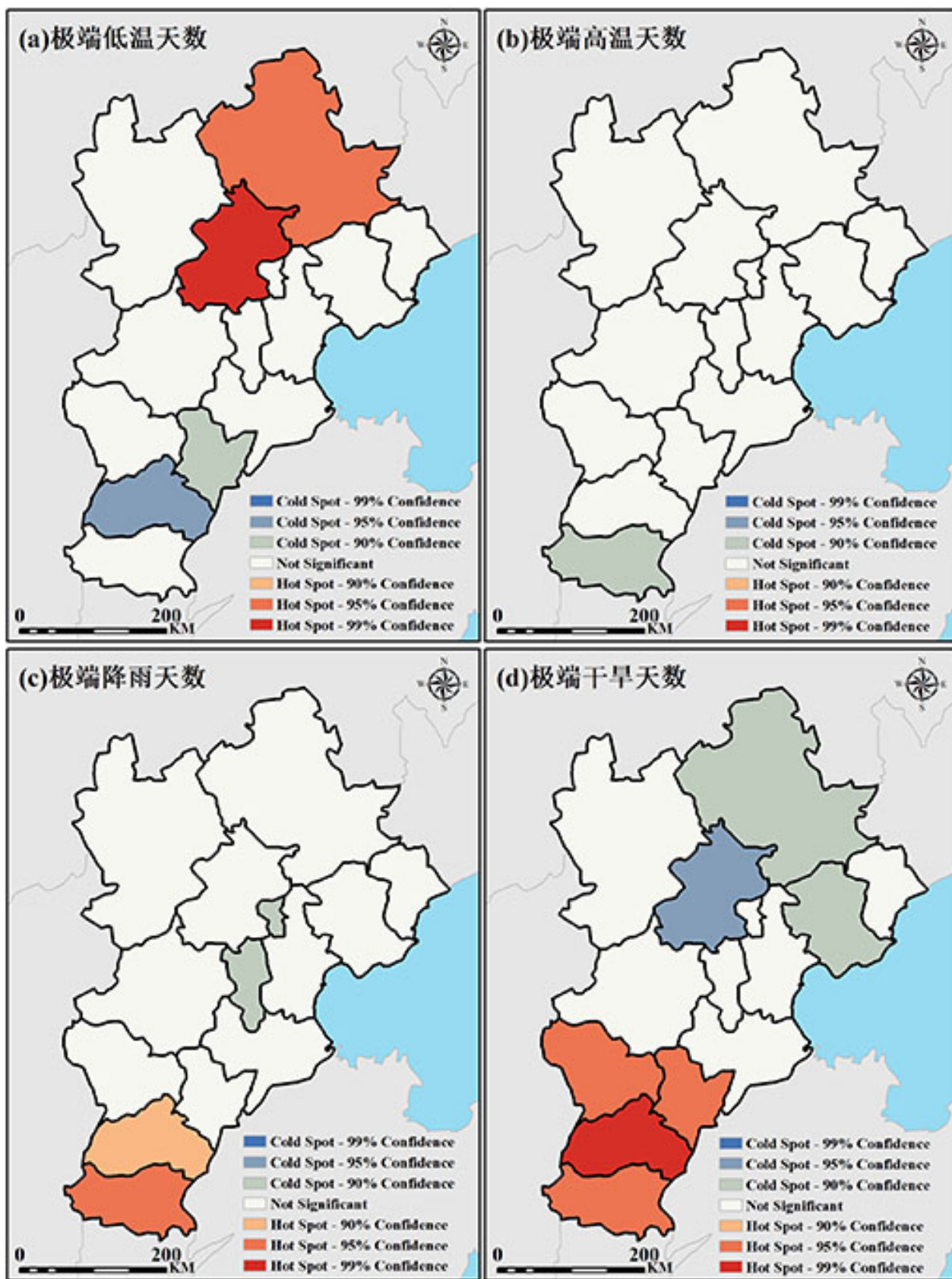


图 6 京津冀地区极端气候事件热点分析

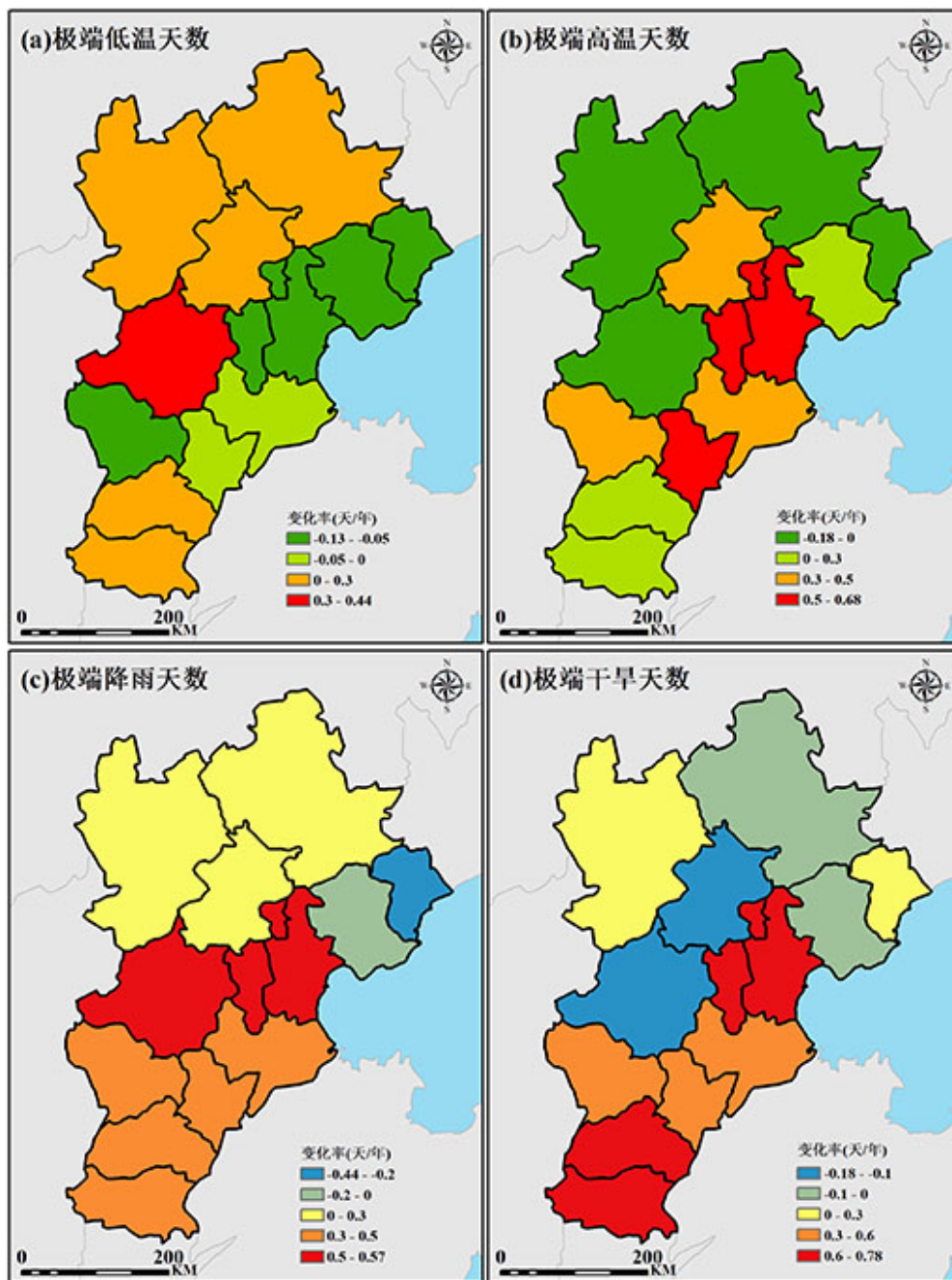


图 7 京津冀地区极端气候事件变化率

### 3 结论

(1) 研究发现, 京津冀地区的极端高温天数和极端降雨天数均呈现出显著的增加趋势, 而极端低温天数在北部部分城市也有所增加。这一趋势与全球变暖及快速城市化的背景直接相关。全球变暖是导致极端高温事件增多的根本原因。同时, 城市规模过大会产生“热岛效应”, 由于城市下垫面性质的

改变、大气污染以及人工废热的排放等, 使城市温度明显高于郊区。这种效应不仅直接加剧高温, 当已有的降雨云系经过城市上空时, 其“热力抬升”作用还会增强对流, 导致降水效率更高、强度更大, 从而使得极端降雨事件增多。

(2) 京津冀地区极端气候指数的空间分布存在显著差异, 总体上表现为南部更易遭受极端高温和

干旱, 而北部则更多面临极端低温和降雨的威胁。这种空间分异格局主要受地理位置和地形气候背景的影响。京津冀地区本身处于半湿润向半干旱过渡的生态脆弱带, 对气候变化高度敏感。南部地区地势相对低平, 降水变率大, 在全球变暖背景下更易出现高温和干旱事件。北部地区(如承德)多为山区, 海拔较高, 气温相对较低, 因此成为极端低温的热点区。同时, 城市群的发展格局也可能通过“热岛效应”的强度差异, 加剧了区域内部气候响应的不平衡性。

(3) M-K 突变检验表明, 京津冀地区不同极端气候指数在过去近 30 年发生了多次突变, 尤其是极端降雨天数的突变时间集中在 2010 年之后, 显示其变化规律较之前更为复杂。2000 年后京津冀地区进入城市化加速期, 大规模的城市建设、土地利用变化和人为热排放显著改变了区域气候环境, 这种强烈的局地强迫可能干扰了原有的大气环流模式, 导致极端气候事件, 特别是对流性强的降雨事件, 在发生时间、频率和强度上出现非线性变化, 表现为突变点的集中出现。

### 参考文献

- [1] 闫慧敏, 陈伟娜, 杨方兴等. 过去 50 年内蒙古极端气候事件时空格局特征[J]. 地理研究, 2014, 33(1): 13-22.
- [2] CMA Climate Change Centre. Blue book on climate change in China (2020) [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [3] 刘凯, 聂格格, 张森. 中国 1951—2018 年气温和降水的

时空演变特征研究[J]. 地球科学进展, 2020, 35(11): 1113-1126.

- [4] Seenu PZ, Jayakumar KV. Comparative study of innovative trend analysis technique with Mann-Kendall tests for extreme rainfall[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14, 536.
- [5] Zhang P, Ren G, Xu Y et al. Observed changes in extreme temperature over the global land based on a newly developed station daily dataset[J]. Journal of Climate, 2019, 32(24): 8489-8509.
- [6] 杨阳, 赵娜, 岳天祥. 1980—2018 年中国极端高温事件时空格局演变特征[J]. 地理科学, 2022, 42(03): 536-547.
- [7] Getis A, Ord JK. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 1992, 24, 189-206.
- [8] Yang Y, Zhao N, Wang Y, et al. Variations in summertime compound heat extremes and their connections to urbanization in China during 1980-2020[J]. Environmental Research Letters, 2022, 17 (2022), 064024.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**