

何佳临, 李铮, 柏钦冕, 等. 1986—2022年山东省极端气温事件及人口暴露度时空变化研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(7): 153-164. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.011

HE Jialin, LI Zheng, BAI Qinmian, et al. Spatiotemporal variations of extreme temperature events and population exposure in Shandong Province from 1986 to 2022[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(7): 153-164. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.011

1986—2022年山东省极端气温事件及人口暴露度时空变化研究

何佳临¹, 李 铮², 柏钦冕¹, 贺山峰¹, 戴尔阜³

(1. 曲阜师范大学 地理与旅游学院, 山东 日照 276800; 2. 湖南师范大学 旅游学院, 湖南 长沙 410006; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:【目的】全球气候变化背景下, 由极端天气导致的各类灾害呈多发频发重发态势。明晰极端气温事件及其人口暴露度变化, 对于保障人民生命健康和经济社会发展具有重要现实意义。【方法】基于气温日观测资料, 运用线性倾向估计、Mann-Kendall 检验、滑动 t 检验和小波分析等方法分析了1986—2022年山东省极端气温事件的时空特征, 并结合全国人口普查数据揭示了山东省县域单元极端气温人口暴露度格局变化。【结果】结果表明: (1) 在时间序列上, 山东省年均高温日数由5.93 d增至12.49 d, 上升速率约为2.0 d/10 a ($P < 0.01$), 年均冰封日数则以0.1 d/10 a的速率呈略微下降趋势。(2) 在空间格局上, 山东省年均高温日数整体由东向西逐渐增多, 年均冰封日数呈现出北高南低的分布特征。与1986—1995年相比, 2013—2022年年均高温日数超过8 d的县域数量增加了227%, 而年均冰封日数无明显空间变化。(3) 1986—2022年期间, 山东省极端高温人口暴露度不断增大, 年均人口暴露度由四普时期的525百万人·d增加到七普时期的1257百万人·d, 高值区位于鲁西南和鲁中地区; 极端低温人口暴露度先增加后减少, 高值区主要分布在鲁东半岛地区。【结论】山东省极端高温事件的发生频率和影响范围均呈显著上升趋势, 叠加上人口数量变化, 极端高温人口暴露度快速增加, 而极端低温事件及其人口暴露度先增后减, 整体变化幅度较小。

关键词: 极端气温; 人口暴露度; 时空变化; Mann-Kendall 检验; 县域尺度; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.011

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P954

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)07-0153-12



收稿日期: 2025-03-10; 修回日期: 2025-04-17; 录用日期: 2025-04-28; 网络出版日期: 2025-05-21

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFA0608202); 山东省泰山学者青年专家计划(tsqn202103065); 日照市科技成果转化项目(2021CSDX002)

作者简介: 何佳临(2004—), 女, 本科, 主要从事气候变化与极端事件研究。E-mail: hejialin-041101@163.com

通信作者: 贺山峰(1980—), 男, 教授, 硕士研究生导师, 博士, 主要从事环境演变与灾害风险研究。E-mail: heshanfeng@163.com

戴尔阜(1972—), 男, 研究员, 博士研究生导师, 博士, 主要从事自然地理综合研究。E-mail: daief@igsr.ac.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Spatiotemporal variations of extreme temperature events and population exposure in Shandong Province from 1986 to 2022

HE Jialin¹, LI Zheng², BAI Qinmian¹, HE Shanfeng¹, DAI Erfu³

(1. School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276800, Shandong, China; 2. College of Tourism, Hunan Normal University, Changsha 410006, Hunan, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] In the context of global climate change, various disasters caused by extreme weather have become more frequent, recurrent, and severe. Understanding the variations of extreme temperature events and their population exposure holds great practical value for protecting people's lives and health, as well as for promoting economic and social development. [Methods] Using daily temperature observations, the spatiotemporal characteristics of extreme temperature events in Shandong Province from 1986 to 2022 were analyzed by using method including linear trend estimation, Mann-Kendall test, sliding *t*-test, and wavelet analysis. Combined with the national census data, the variation patterns of population exposure to extreme temperature at the county level in Shandong Province were revealed. [Results] (1) Temporally, the annual average number of high-temperature days in Shandong Province increased from 5.93 d to 12.49 d, with an increasing rate of 2.0 d/10 a ($P < 0.01$), while the annual average number of frozen days showed a slight downward trend at a rate of 0.1 d/10 a. (2) Spatially, the annual average number of high-temperature days in Shandong Province gradually increased from east to west, and the annual average number of frozen days showed a distribution pattern of being higher in the north and lower in the south. Compared with the period from 1986 to 1995, the number of counties with an annual average number of high-temperature days exceeding 8 d increased by 227% during the period from 2013 to 2022, while no significant spatial changes were observed in the annual average number of frozen days. (3) From 1986 to 2022, the population exposure to extreme high temperature in Shandong Province increased continuously, with the annual average population exposure rising from 5.25 million people · d during the Fourth National Population Census to 12.57 million people · d during the Seventh National Population Census. Areas with high values were located in the southwestern and central Shandong. The population exposure to extreme low temperature first increased and then decreased, with high-value areas mainly distributed in the eastern Shandong Peninsula. [Conclusion] Both the frequency and influence range of extreme high-temperature events in Shandong Province have shown significant upward trends. Combined with changes in population size, the exposure to extreme high temperature increases rapidly, while extreme low-temperature events and their population exposure first increase and then decrease, with relatively small overall variations.

Keywords: extreme temperature; population exposure; spatiotemporal variation; Mann-Kendall test; county-level scale; influencing factors

0 引言

IPCC 第六次评估报告 (AR6) 指出, 目前全球平均温度较工业化前水平已升高 1.1 °C。在此背景下, 各类极端天气事件的发生频率、强度、持续时间及影响范围等特征发生了明显改变^[1]。极端气温变化是对全球变暖响应的主要表现形式之一, 同时也对自然生态、人类健康和社会经济等方面造成了不可忽视的影响^[2-3]。2003 年欧洲热浪至少导致 3 万人死亡, 成为欧洲历史上最致命的气候灾害; 2022 年我国长江流域发生持续极端高温干旱, 致使 3978 万人受灾, 直接经济损失 408.5 亿元, 对社会经济发展和生态系统造成了严重破坏。相关研究表明, 全球大部分地区极端高温的强度变化与增暖幅度成正比, 但气候变暖并不意味着极端低温的影响会降低^[4-5]。据应急管理

部报道, 2024 年第一季度我国遭遇了 2009 年以来最严重的低温雨雪冰冻灾害, 共导致 636 万人次受灾, 农作物受灾面积 6 712 km², 直接经济损失达 197.5 亿元。

学术界针对极端气温事件变化特征展开了广泛研究。于时间维度, 学者们基于气象观测数据和再分析资料, 发现全球绝大部分地区极端高温事件呈现出频率更高、强度更强、持续时间延长的变化特点^[6-7], 而极端低温事件的频率和强度整体有所下降^[8-9]。我国极端低温在冬季的增温趋势最明显, 极端高温则在秋季显著增加, 且极端低温的变化幅度大于极端高温的增幅^[10]。此外, 有学者利用气候模式数据预估未来全球范围内极端气温事件变化, 发现极端暖事件将继续增加, 尤其在高排放情景下, 目前 50 a 一遇的

极端高温事件未来将变为 10 a 一遇甚至更加频繁, 而极端冷事件将会有所减少^[11-13]。在空间维度上, 极端气温事件在不同区域、气候带和地形地貌条件下存在明显的空间分异特征。就全球而言, 由于高纬度地区增暖速率整体高于低纬度地区, 使得高纬度地区极端温度事件的变化也明显大于低纬度地区^[14]。中国北方极端低温的负趋势系数略大于南方, 极端高温事件的频率变化则呈现出东南沿海地区减少、西北内陆地区增加的特点^[15-16]。此外, 部分研究还综合考量了大气环流模式^[17-18]、城市化进程^[19-20]等多种因素对极端气温的影响, 以揭示极端气温事件变化的复杂性与多样性。梳理文献发现, 已有极端气温事件研究大多侧重于其时空变化、物理特征及影响因素分析^[21-23], 而对于 IPCC AR6 强调的不同区域人群在面对极端气温时的暴露度和脆弱性差异^[1], 尚未给予充分关注和深入探究, 这在一定程度上限制了对极端气温事件综合影响的全面理解和对策制定的精准性。随着气候变暖和人口老龄化, 2050 年全球将有近 2.5 亿 69 岁及以上老年人暴露于危险高温环境, 且由于气候、人口、经济水平差异, 不同地区极端气温对人类健康的影响程度不同, 尤以亚洲和非洲的暴露人数最多^[24]。另一项模拟研究表明, 本世纪末欧洲城市中温度相关死亡率可能因气温上升增加 50%, 累计死亡人数将超过 200 万^[25]。上述研究虽然量化了极端气温下人口暴露度整体状况, 但研究范围和空间尺度较大, 难以更为精确地呈现人口与极端气温的局地空间耦合关系, 这不利于具体开展极端气温灾害的防灾减灾工作。

山东省人口众多、经济发达, 在黄河流域生态保护和高质量发展战略中发挥着龙头作用。近些年来, 山东省受极端气温事件的影响愈加严重, 夏季高温热浪频繁且强度加大, 内陆地区居民中暑人数增多, 能源供应承压; 冬季低温寒潮不时出现, 不仅导致农作物受冻减产, 还给交通运输等行业带来诸多威胁。目前关于极端事件人口暴露度的量化研究, 大多集中在对现阶段某一时期开展评估或对未来气候变化情景下的预估, 而对于过去多个时间截面人口暴露度的演变过程尚不明确。虽有部分学者围绕山东省极端气温展开研究^[26-28], 但对于极端气温事件对人员健康的影响, 尤其是针对极端气温人口暴露度时空变化研究鲜有涉及。基于此, 本研究在分析 1986—2022 年山东省极端气温事件时空特征的基础上, 结合人口统计数据, 明晰不同时段山东省县域单元极端气温人口暴露度变化, 以期为加强山东省极端气温灾害风险管理、

合理制定防灾减灾对策提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

山东省位于中国东部沿海、黄河下游, 面积约 15.58 万 km², 由半岛和内陆两部分构成。山东省位于中国第三级地势阶梯, 地势呈中部高四周低的特点, 地形以平原、山地和丘陵为主, 中部山地以泰山最为典型, 西南与西北区域地形平坦, 东部为低缓丘陵(见图 1)。山东省受地理位置、地形条件和大气环流等多重因素影响, 形成典型的暖温带大陆性季风气候, 其特征表现为春秋短、夏冬长, 夏季炎热多雨、冬季寒冷干燥。全省年平均气温为 13.2 ℃, 空间上整体呈现南部高于北部, 西部高于东部, 年降水量一般在 600 mm 以上, 由东南沿海向西北内陆地区逐渐减少。山东省是人口和经济大省, 截止至 2023 年年末, 辖 16 个地级市 136 个县级行政单位, 常住人口约为 10 123 万, 地区生产总值超过 9.2 万亿元, 占全国经济总量的 7.3%, 连续多年稳居第三位。由于山东省的气候特征和水资源分布差异, 容易遭受高温热浪、低温寒潮、水旱及台风灾害, 对农业、生态和生产生活造成了较大影响。

1.2 数据来源

气象观测资料是由国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)提供的山东省 122 个站点 1986 年 1 月—2022 年 12 月的逐日气温数据, 该数据集经过了严格的质量控制, 被广泛适用于中国地区气候变化与极端事件研究。考虑到研究时间跨度较大、气象站点迁站、资料缺失或缺测等问题, 遵循气温观测资料的连续性和完整性原则, 最终筛选出 91 个有效站点数据应用于本研究(见图 1)。

人口统计数据来自国家统计局发布的第四次到第七次全国人口普查数据。根据人口普查资料, 整理出 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年四个时间截面山东省县域单元人口数量。

1.3 研究方法

1.3.1 极端气温事件定义

参考中国气象局和气候变化检测与指数专家组(ETCCDI)相关规定^[29], 选取高温日数和冰封日数分别作为极端高温事件和极端低温事件的量化指标, 具体定义如表 1 所列。

1.3.2 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法是气象气候领域应用广泛的统计检验方法, 可用于分析温度、降水、气压等气

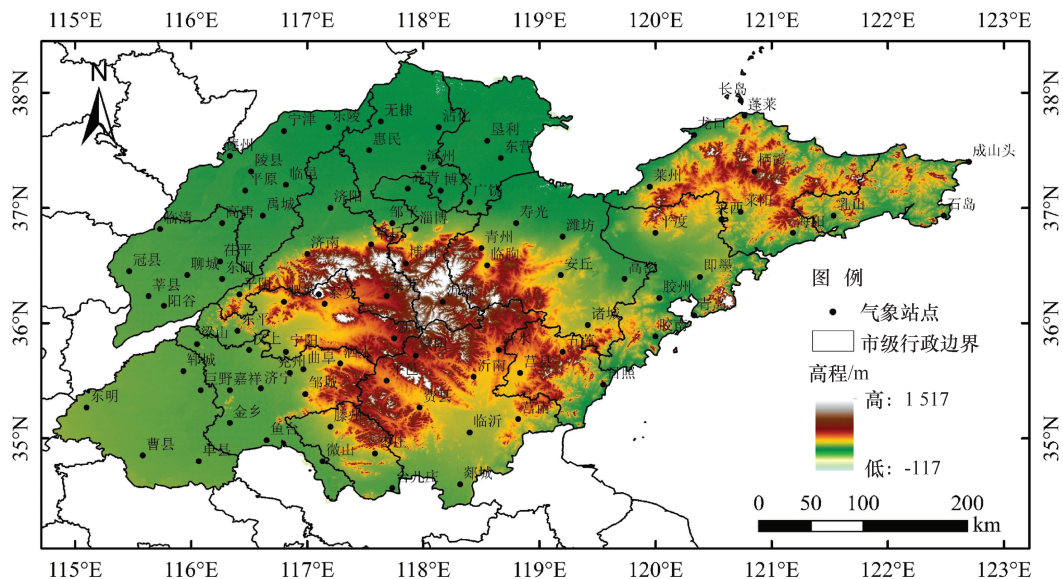


图1 山东省气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Shandong Province

表1 极端气温事件指标定义

Table 1 Definitions of indicators for extreme temperature events

极端气温事件	指标名称	指标定义	单位
极端高温事件	高温日数	每年日最高气温 ≥ 35 °C的天数	d
极端低温事件	冰封日数	每年日最高气温 < 0 °C的天数	d

象要素的长期变化趋势。本研究使用 M-K 检验法分析山东省极端气温事件在时间序列上趋势变化的显著性和突变发生年份。

1.3.2.1 Mann-Kendall 趋势检验

设 x_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 为时间序列变量, n 为样本个数, 则统计量 S 可被定义为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \quad (i < j) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, S 代表正态分布, 均值等于 0。

其方差计算公式为

$$\text{Var}(S) = \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} \quad (3)$$

不同 S 区间对应 Z 值为

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

在 M-K 趋势检验中, 当 $Z > 0$ 或 $Z < 0$ 时, 则表示

变化趋势增加或减少。当 $|Z|$ 分别大于等于 1.64、1.96 和 2.58 时, 表示显著性检验水平分别达到了 90%、95% 和 99%。

1.3.2.2 Mann-Kendall 突变检验

由秩序列 $r(x_i - x_j)$ 计算得到统计量为

$$S_k = \sum_{i=1}^k r(x_i - x_j) \quad (2 \leq k \leq n) \quad (5)$$

$$r(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & x_i - x_j > 0 \\ 0, & x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (6)$$

当时间序列具有独立性时, UF_k 可由 S_k 标准化计算得的一条曲线, 其计算公式为

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (7)$$

$$E(S_k) = k(k - \frac{1}{4}) \quad (8)$$

$$\text{Var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (9)$$

UB_k 表示反向样本序列计算得到的统计量, 其计算公式为

$$UB_k = -UF_{n-k+1} \quad (k = n, n-1, \dots, 1) \quad (10)$$

绘制出 UF_k 和 UB_k 曲线图, 若 $UF_k > 0$, 说明序列呈上升趋势, 反之呈下降趋势, 在 0 值附近波动, 说

明没有明显的趋势变化。在 $\alpha=0.05(0.01)$ 的显著性水平下, $UF_k > 1.96(2.58)$, 则表明上升趋势显著; $UF_k < -1.96(-2.58)$, 则表明下降趋势显著。如果这两条曲线出现交点, 且交点介于临界线之间, 则交点对应年份即为突变开始时间。

1.3.2.3 滑动 t 检验

滑动 t 检验通过将气候序列中两段子序列均值差异是否显著转化为两个总体均值差异问题进行检验, 若子序列均值差异超特定显著性水平, 则判定有突变发生。本研究使用滑动 t 检验进一步对 M-K 检验法识别出的极端气温事件突变年份进行验证。具体公式为

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (11)$$

$$s = \sqrt{\frac{n_1 1_2^s - n_2 2_2^s}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (12)$$

式中, n 个样本量的时间序列为 x , 遵从自由度 $v = n_1 + n_2 - 2$ 的 t 分布。人为设置某一时刻为基准点, 基准点前后两段子序列 x_1 和 x_2 的样本分别为 x_1 和 x_2 , 两段子序列平均值为 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 , 方差为 1_2^s 和 2_2^s 。

1.3.3 小波分析

小波分析是进行信号时频分析和处理的理想工具, 能够充分突出问题的周期特征, 对时间(空间)频率的局部化分析。本文利用 Morlet 小波变换系数的实部和方差分析山东省极端气温事件的周期变化特征。具体公式为

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{l=1}^N f(l\Delta t) \times \bar{\varphi}\left(\frac{l\Delta t - b}{a}\right) \quad (13)$$

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \sum_{l=1}^N f(l) \times e^{mct} e^{-l^2/2} \quad (14)$$

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (15)$$

式中, $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; $Var(a)$ 为小波方差; $-\varphi$ 为 $\varphi(t)$ 为复共轭函数; a 为尺度因子, 反映小波的周期长度; b 为时间因子, 反映时间平移; m 为虚数; N 为样本容量; t 为时间; Δt 为取样时间间隔; 常数 $c = 6.2$ 。

1.3.4 极端气温人口暴露度计算

参考前人已有研究^[30], 人口暴露度定义为极端事件日数与对应区域人口数量的乘积。本文中极端气温人口暴露度是将第四次至第七次全国人口普查人口数量分别与对应时段年均极端气温日数相乘, 量化单位为人·d。具体公式为

$$E_{HD(FD)} = HD(FD) \times POP \quad (16)$$

式中, $E_{HD(FD)}$ 表示极端高温(低温)人口暴露度(人·d); $HD(FD)$ 为某县域年均高温(冰封)日数(d); POP 为该县域人口数量(人)。

为降低年际间气候差异的偶然性, 使用人口普查年份前后 10 年的气象观测数据计算各时段县域单元年均极端气温日数, 第四次至第七次人口普查数据对应各时段的起止年份分别为 1986—1995 年、1996—2005 年、2006—2015 年和 2013—2022 年。

此外, 本文还应用线性倾向估计法来量化 2 个极端气温指标的变化速率。

2 结果分析

2.1 极端气温事件时空分异特征

2.1.1 极端气温事件时间序列变化

分析 1986—2022 年山东省极端气温事件的时间序列及周期变化发现:

(1) 山东省年均高温日数呈显著上升趋势, 而年均冰封日数微弱减少, 两个指标年际间均有较大波动(见图 2)。1986—2022 年期间, 山东省年均高温日数平均为 8.68 d, 以 2.0 d/10 a 的速率上升($P < 0.01$), 均值由 1986—1995 年的 5.93 d 增加到 2013—2022 年的 12.49 d, 期间最大值为 18.62 d, 出现在 2019 年, 最小值为 2008 年的 1.41 d。山东省年均高温日数于 2014 年发生增加突变, 此后波动上升且显著性增强。在整个研究期内, 山东省年均冰封日数的均值为 7.98 d, 下降速率为 0.1 d/10 a, 趋势变化并不显著, 但年际间差异很大, 最大值为 2010 年的 18.02 d, 是最小值 0.96 d(1995 年)的 18.8 倍。年均冰封日数于 1989 年发生减少突变, 但在 1995—2000 年期间有所回升, 近十年变化以较明显的下降趋势为主。

(2) 极端气温事件周期变化特征明显, 高温日数和冰封日数呈反相周期性变化(见图 3)。山东省年均高温日数在 37 a 的特征时间尺度上以 26 a 为第一主周期振荡, 在研究期内经历了少—多—少—多的循环交替, 近 3 a 为正值且即将达到顶峰; 而冰封日数在 37 a 和 56 a 的特征时间尺度上分别存在着 23 a 和 33 a 的第一主周期, 具有多—少—多—少的周期变化。此外, 极端高温和极端低温均存在着次要变化周期, 在较小年代际尺度的周期振荡方面, 随时间尺度减小, 变化周期缩短、振荡强度变弱。其中, 高温日数在 7 a 的特征时间尺度上以 4 a 为周期的振荡, 但只在 1991—2022 年周期性表现明显; 冰封日数在 16 a 和 5 a 的特征时间尺度上存在以 10 a 和 3 a 为周

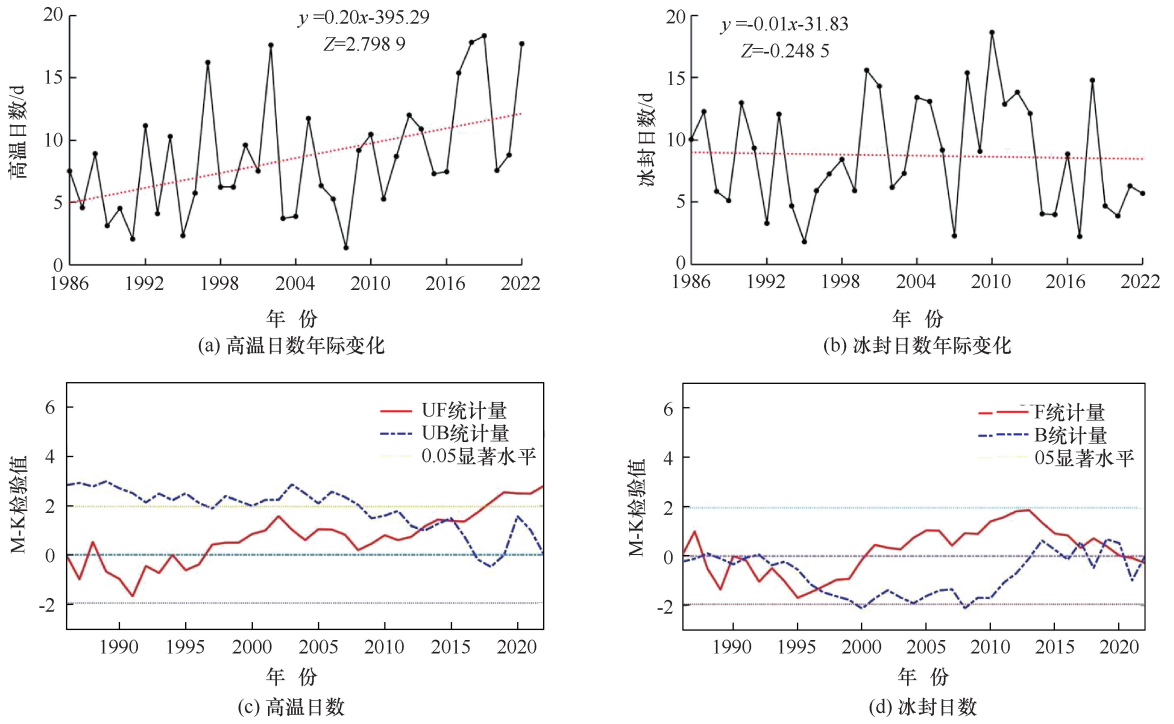


图2 1986—2022年山东省极端气温事件年际变化及其Mann-Kendall检验

Fig. 2 Interannual variation and Mann-Kendall test of extreme temperature events in Shandong Province (1986—2022)

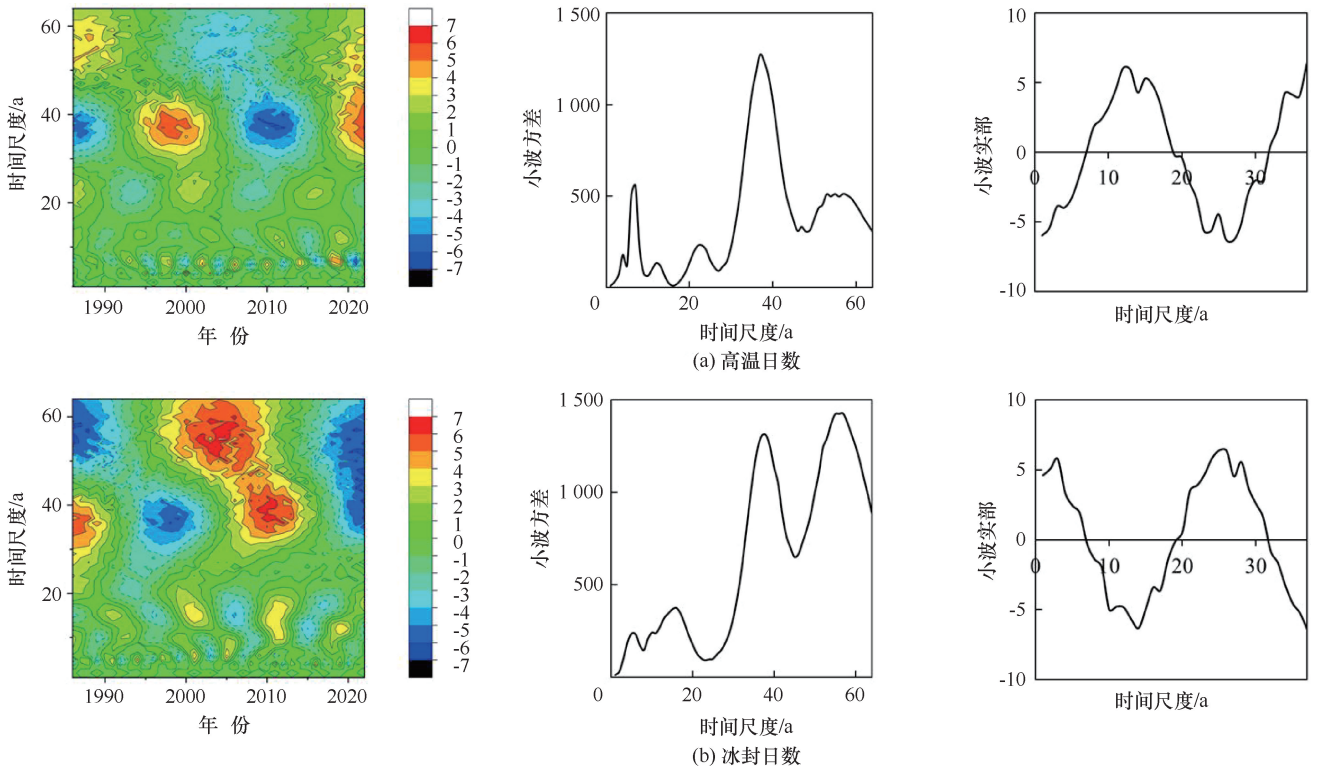


图3 1986—2022年山东省极端气温事件小波分析

Fig. 3 Wavelet analysis of extreme temperature events in Shandong Province (1986—2022)

期的振荡, 分别在1994—2022年和1987—2007年两个时段周期性比较明显。

2.1.2 极端气温事件空间格局及变化

利用 ArcGIS 分析 4 个时段极端气温事件的空间

格局及其变化,发现山东省年均高温日数和冰封日数具有明显的空间分异特征,具体表现如下。

(1)山东省年均高温日数整体由东向西逐渐增多,高值区(年均高温日数 >8 d)的范围先减后增,近十年范围增大非常快速(见图4)。1986—1995年,山东省年均高温日数的均值为5.93 d,年均高温日数大于8 d的县域单元数量为33个,集中分布在济南、淄博、聊城以及菏泽等地区,这一时段尚未出现年均高温日数大于12 d的县域。1996—2005年,山东省年均高温日数均值快速增加到8.96 d,主要是由于全省年均高温日数大于8 d的县域单元增加到85个,约为1986—1995年的2.6倍,同时大于12 d的县域数量也增至39个,集中分布在鲁西北地区。2006—2015年,山东省年均高温日数均值降为7.77 d,这主要是由于年均高温日数大于12 d的县域数量减少为6个,但高于8 d的县域数量(82个)与1996—2005年基本持平,变化不大。2013—2022年,山东省年均高温日数均值显著增加(12.49 d),年均高温日数大于12 d的县域数量为87个,是2006—2015年的14.5倍之多,大于8 d的县域数量为108个,年均高温日数高值区的分布范围也表现为由内陆逐渐向东部沿海地区延伸。

(2)山东省年均冰封日数呈北部多、南部的分

布格局,高值区(年均冰封日数 >12 d)的空间范围先缓慢增大后迅速减小(见图5)。在1986—1995年期间,山东省年均冰封日数均值为6.93 d,仅有3个县域单元超过12 d,且集中在半岛北部的烟台市,此阶段无年均冰封日数大于16 d的县域。1996—2005年,山东省年均冰封日数均值快速增加到9.02 d,这主要是由于大于12 d的县域数量大幅增加至23个,约为1986—1995年的7.7倍,且新增了2个年均冰封日数大于16 d的县域。2006—2015年,山东省年均冰封日数均值为9.41 d,较1996—2005年期间均值略有增加,年均冰封日数高于12 d的县域数量进一步上升至39个,大于16 d的县域数量增加至6个。但2013—2022年,山东省年均冰封日数均值显著减少为5.98 d,南部地区年均冰封日数低于4 d的范围迅速扩大,而大于12 d的县域数量锐减至2个,且无大于16 d的县域,冰封日数大于8 d的县域主要分布在半岛地区。

2.2 极端气温人口暴露度变化

2.2.1 极端高温人口暴露度变化

如图6所示,伴随着高温日数和人口数量变化,山东省极端高温人口暴露度在各时段表现出明显的动态特征,全省人口暴露度总量从525.13百万人·d增加到1 256.94百万人·d。在研究期的四个时段,山

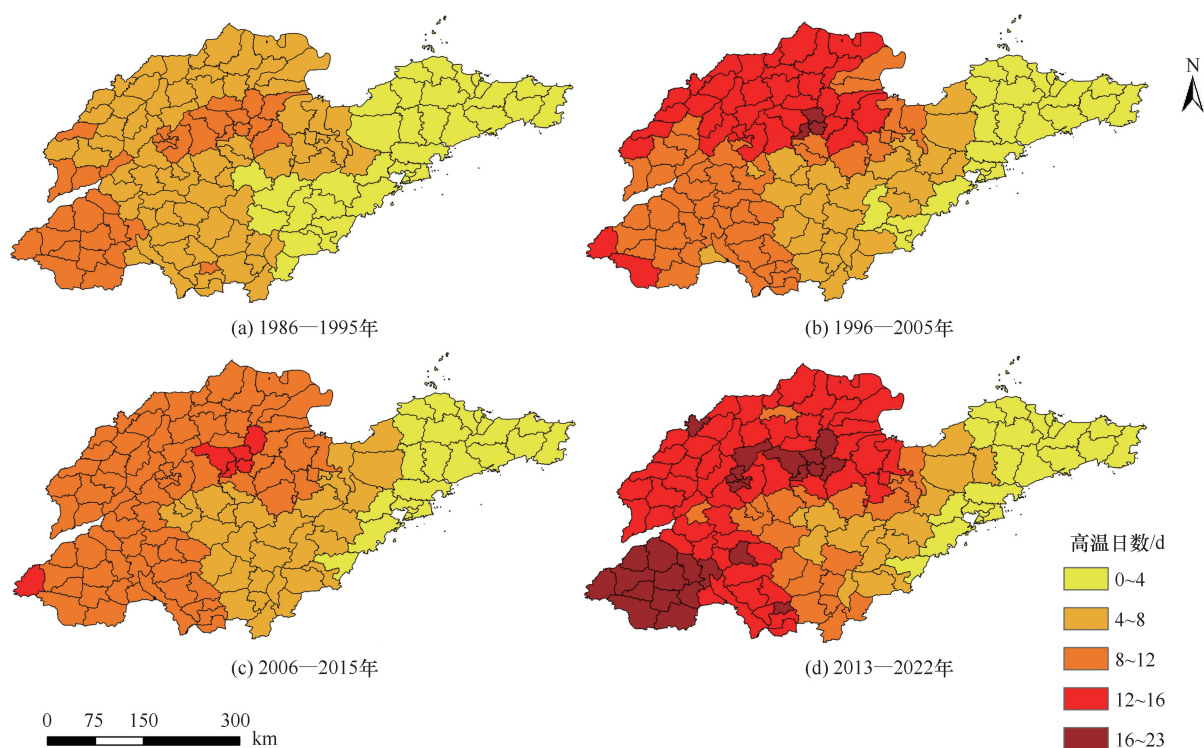


图4 1986—2022年山东省年均高温日数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual average number of high-temperature days in Shandong Province (1986—2022)

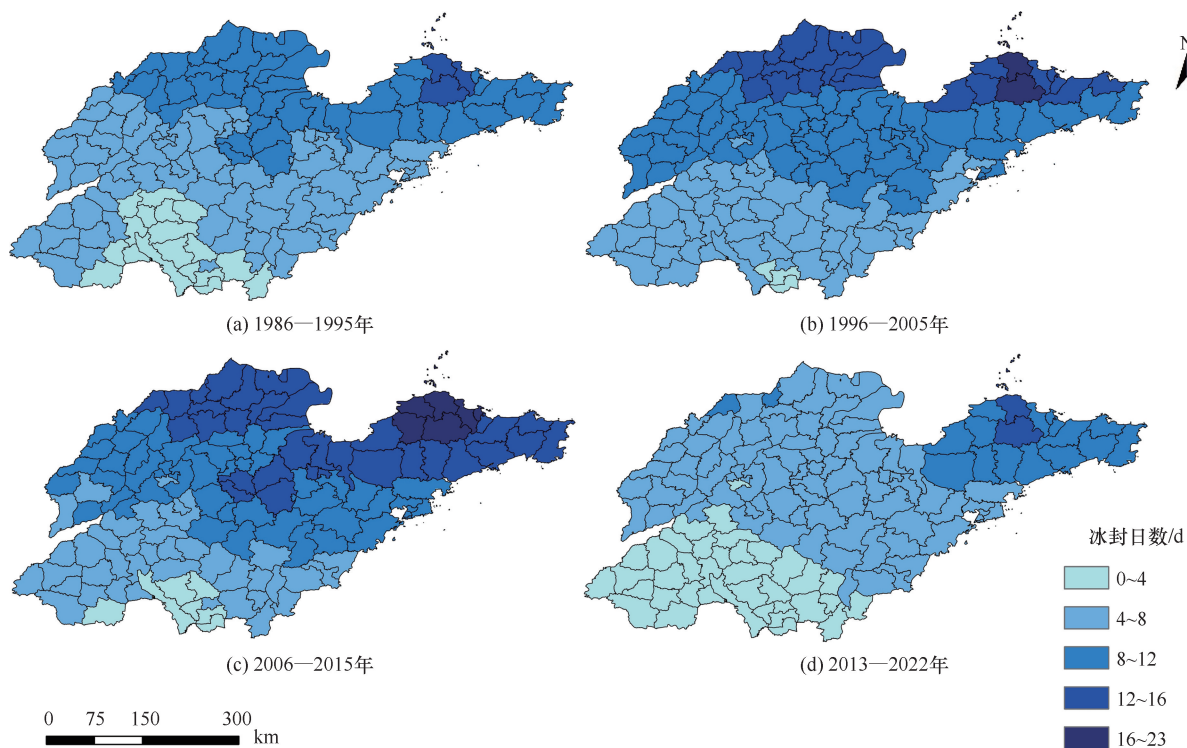


图5 1986—2022年山东省年均冰封日数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual average number of frozen days in Shandong Province (1986—2022)

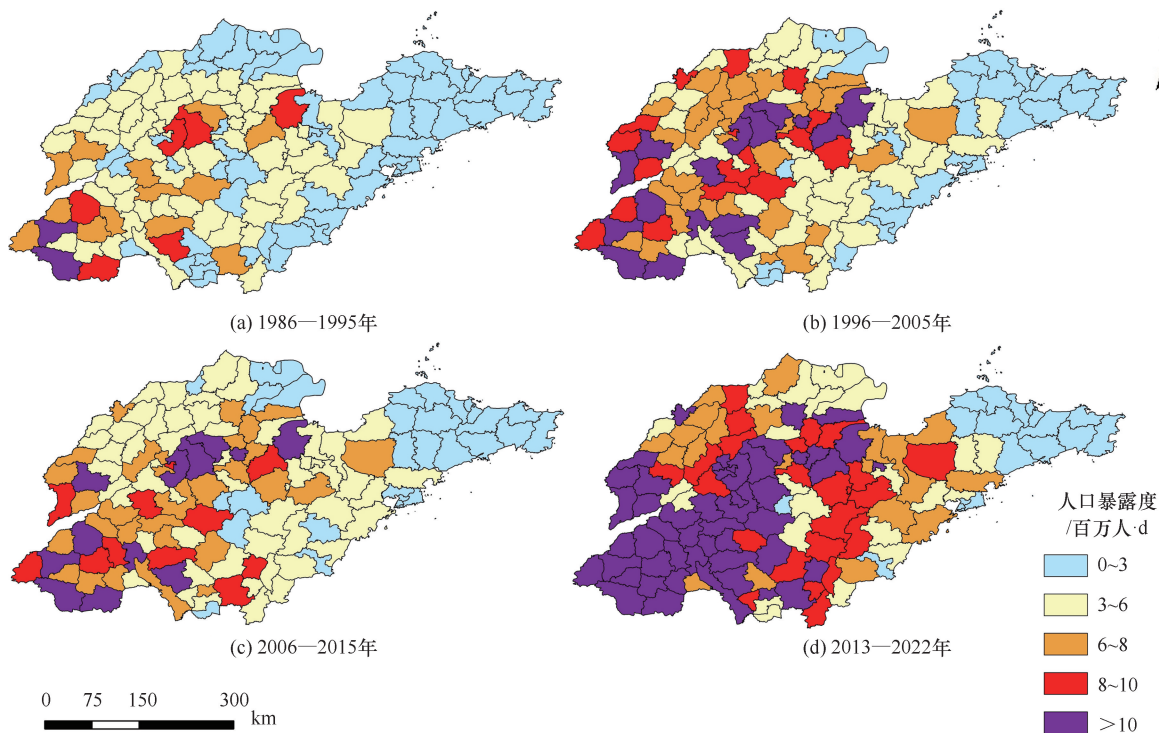


图6 1986—2022年山东省极端高温人口暴露度空间变化

Fig. 6 Spatial variation of population exposure to extreme high temperature in Shandong Province (1986—2022)

山东省极端高温人口暴露度超过8百万人·d的县域数量由1986—1995年的8个增至2013—2022年的73个, 超过1千万人·d的县域数量也从2个增加到

50个, 整体均呈现快速增长态势, 且覆盖范围逐步从西部内陆地区向东部沿海地区延伸。可见, 随着时间的推移, 山东省极端高温人口暴露度在广度与强度

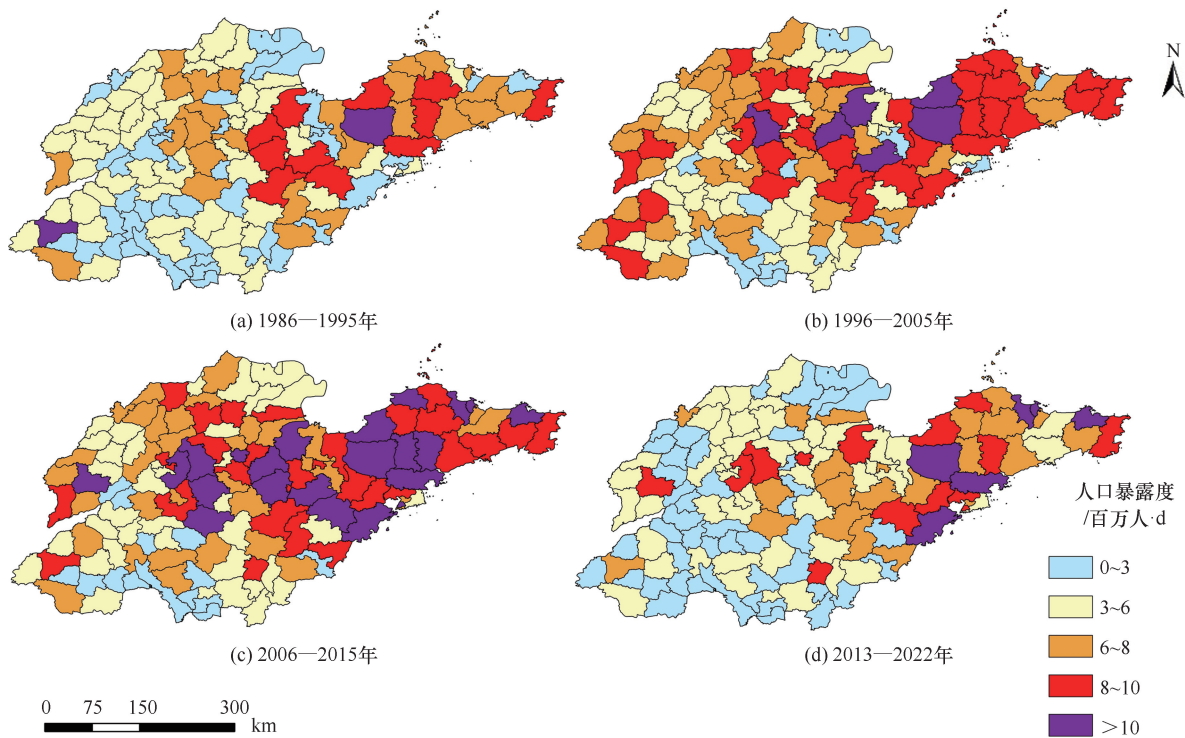


图7 1986—2022年山东省极端低温人口暴露度空间变化

Fig. 7 Spatial variation of population exposure to extreme low temperature in Shandong Province (1986—2022)

两个维度上均呈现出显著上升的趋势,这种变化是人口数量增多和高温日数增加双重因素共同作用的结果。进一步分析发现,高温日数人口暴露度的高值区域主要集中在人口超过100万和年均高温日数超过10 d的县域单元,比如1986—1995年的牡丹区、曹县、滕州市、单县、郓城县,1996—2005年的曹县、牡丹区、滕州市、寿光市、章丘区,2006—2015年的曹县、牡丹区、滕州市、寿光市、东昌府区以及2013—2022年的牡丹区、历城区、曹县、滕州市、任城区。而仅人口数量和高温日数单一要素较高的县域,其极端高温人口暴露度普遍处于中等水平,这说明人口密集和高温频发叠加的地区,应对极端高温人口健康影响的迫切性更强。

2.2.2 极端低温人口暴露度变化

图7呈现了1986—2022年山东省极端低温人口暴露度的时空变化,可以发现极端低温人口暴露度呈先增后减的趋势。具体来看,山东省极端低温人口暴露度从1986—1995年的573百万人·d持续增加至2006—2015年的881.35百万人·d,但在2013—2022年快速减少到588.66百万人·d。在研究期的四个时段,山东省极端低温人口暴露度超过7百万人·d的县域单元数量分别为13个、41个、51个和20个,超过1千万人·d的县域数量分别为2个、6个、22

个和6个,亦均呈现出先增加后减少的变化,这与年均冰封日数变化规律较为一致。同时,人口数量因素在其中所起的作用亦不可忽视,山东省极端低温人口暴露度的高值区主要分布在半岛地区人口超过100万和年均冰封日数超过8 d的县域单元,鲁西和鲁南地区人口暴露度普遍较低,暴露度最高的5个县域单元由1986—1995年的牡丹区、平度市、莱州市、栖霞市、安丘市变为2013—2022年的环翠区、福山区、黄岛区、即墨区、平度市。

3 讨论

对于极端天气事件的定义和识别主要有绝对阈值法、相对阈值法、概率分布模型和持续性指标等多种方法^[31]。尽管不同定义方法在解析极端事件时空变化特征层面存在一定差异,但核心结论却往往能呈现出很高的一致性。以极端高温事件为例,环海军等^[32]基于绝对阈值法定义了高温日数,指出山东省高温日数在1981—2022年以倾向率为1.9 d/10 a的速率显著增加;卢珊等^[33]采用相对阈值法的定义发现1961—2022年中国极端高温日数以2.1 d/10 a的速率增长($P < 0.01$)。这些研究与本文中山东省极端高温事件以2.0 d/10 a的速率显著增加基本相符,相互验证了1980年代以来中国及各区域极端高温事件

增强的趋势。本文发现研究期内山东省极端温度事件呈现显著空间分异, 年均高温日数呈自东向西递增趋势, 冰封日数则呈北多南少分布格局, 这与刘玄等^[26]的结论较为一致。焦文慧等^[34]指出其形成机制可归结于海陆热力差异与地形协同作用以及环流配置强化的结果。夏季胶东半岛受海洋热惯性调节抑制夏季极端高温, 而西部黄泛平原受热容量低、地形遮蔽缺失及西风带暖脊影响, 形成高温梯度; 冬季北部平原受冷空气直驱与辐射冷却作用主导, 南部鲁南丘陵则通过地形屏障与海洋滞后效应减少冰封日数频率, 这些因素叠加进一步放大温度梯度的空间异质性。

伴随着极端天气事件特征变化, 未来全球将面临更为严重的人口暴露风险^[35-36]。现有对极端气温人口暴露研究主要是针对极端高温和热浪开展, 对极端低温人口暴露关注相对较少^[37]。本文发现山东省极端高温事件人口暴露度在研究期内持续增大, 而极端低温人口暴露度则呈现出先增后减的阶段性演化特征。从分布上看, 暴露度高值区主要集中于人口集聚区与极端气温高频区的空间耦合地带。在全球气候变暖与快速城市化共同作用下, 人口暴露度高值区存在空间扩张与强度增大的双重风险, 其演化机制亟待通过城乡气候适应性规划进行干预。另一方面, 特殊地理单元与脆弱人群的差异化暴露特征也应给予重点关注。脱贫地区因具有更高的脆弱性会面临更高的反贫风险, 而孕妇、儿童、老年群体、慢性病患者及户外工作者等敏感人群在极端气温事件中具有显著暴露脆弱性^[38]。因此, 未来研究应构建多尺度分析框架, 重点解析城市化过程对人口暴露度的驱动效应, 并加强气候变化敏感区与弱势群体暴露响应的定量评估, 以完善区域气候风险治理体系。

4 结论

本文应用气象观测资料 and 人口普查数据, 分四个时段探究了1986—2022年山东省县域单元极端气温事件及人口暴露度的时空变化, 得到以下主要结论。

(1) 研究期内, 山东省年均高温日数为8.68 d, 以2 d/10 a 速率显著上升($P < 0.01$), 年均冰封日数为7.98 d, 以0.1 d/10 a 速率微弱下降。年均高温日数和年均冰封日数周期性变化相反, 高温日数在37 a 特征时间尺度上以26 a 为第一主周期振荡, 冰封日数在37 a 和56 a 特征时间尺度上分别以23 a 和33 a 为第一主周期振荡。

(2) 山东省年均高温日数呈西高东低的空间格

局, 年均冰封日数则整体呈北高南低的分布格局; 年均高温日数高值区范围逐渐由内陆地区向沿海地区扩大, 而年均冰封日数高值区范围先增加后迅速减少, 在近期主要集中在半岛地区。

(3) 山东省极端高温人口暴露度主要呈增加趋势, 从1986—1995年的525.13 百万人·d 增加到2013—2022年的1 256.94 百万人·d, 极端低温高温人口暴露度先增加后减少, 从1986—1995年的573 百万人·d 增加到2006—2015年的881.35 百万人·d, 之后迅速减少到2013—2022年的588.66 百万人·d。极端高温人口暴露度在鲁西南地区较高, 如牡丹区、曹县、滕州市等, 极端低温人口暴露度则主要分布在半岛地区, 如环翠区、平度市、莱州市等。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [2] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63, 84.
ZHAI P M, LIU J. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(9): 55-63, 84.
- [3] BUELOW F A, BROWER A, CRADOCK-HENRY N. Framing resilience: Post-disaster communication in Aotearoa-New Zealand [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2025, 117: 105167.
- [4] GUAN X D, GAO Z K, HUANG J P, et al. Speeding extreme cold events under global warming [J]. Environmental Research Letters, 2022, 17(8): 084012.
- [5] 张存杰, 肖磊, 李帅, 等. 极端气候事件综合危险性等级指标构建及近60年来长江流域极端气候综合分析[J]. 地球物理学报, 2023, 66(3): 920-938.
ZHANG C J, XIAO C, LI S, et al. Construction of multi-extreme climate events composite grads index and comprehensive analysis of extreme climate in the Yangtze River Basin from 1961 to 2020 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(3): 920-938.
- [6] JOHNSON N C, XIE S P, KOSAKA Y, et al. Increasing occurrence of cold and warm extremes during the recent global warming slowdown [J]. Nature Communications, 2018, 9: 1724.
- [7] DAVARIASHTIYANI A, TAHERKHANI M, FATTAHPOUR S, et al. Exponential increases in high-temperature extremes in North America [J]. Scientific Reports, 2023, 13: 19177.
- [8] NERANTZAKI S D, PAPALEXIOU S M, RAJULAPATI C R, et al. Nonstationarity in high and low-temperature extremes: Insights from a global observational data set by merging extreme-value methods [J]. Earth's Future, 2023, 11(11): e2023EF003506.
- [9] BLACKPORT R, FYFE J C. Amplified warming of North American

- cold extremes linked to human-induced changes in temperature variability[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 5864.
- [10] 王岱, 游庆龙, 江志红, 等. 中国极端气温季节变化对全球变暖减缓的响应分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 36-46.
WANG D, YOU Q L, JIANG Z H, et al. Response of seasonal extreme temperatures in China to the global warming slow down[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 36-46.
- [11] LEWIS S C, KING A D, PERKINS-KIRKPATRICK S E, et al. Regional hotspots of temperature extremes under 1.5 °C and 2 °C of global mean warming[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2019, 26: 100233.
- [12] KUANG X Y, ZHANG Y C, WANG Z Y, et al. Characteristics of boreal winter cluster extreme events of low temperature during recent 35years and its future projection under different RCP emission scenarios[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 138(1): 569-579.
- [13] ZHANG X L, HUANG T S, WANG W P, et al. Change of global land extreme temperature in the future [J]. *Global and Planetary Change*, 2024, 242: 104583.
- [14] ZHOU S, YU B F, ZHANG Y. Global concurrent climate extremes exacerbated by anthropogenic climate change[J]. *Science Advances*, 2023, 9(10): eabo1638.
- [15] 孔锋. 1961—2018年中国极端冷暖事件变化及其空间差异特征[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(9): 34-44.
KONG F. The change of extreme cold and warm events in China from 1961 to 2018 and their spatial differences[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(9): 34-44.
- [16] LUO Y B, ZHOU Y K, ZHOU C H. Spatio-temporal patterns of temperature extremes and their response to atmospheric circulation factors in China from 1961 to 2020 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2024, 34(10): 1883-1903.
- [17] HORTON D E, JOHNSON N C, SINGH D, et al. Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends[J]. *Nature*, 2015, 522(7557): 465-469.
- [18] 孙钰衡, 张辰光, 刘翼泽, 等. 1970—2019年河南省气温变化特征及其对 ENSO 事件的响应[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2023, 36(4): 528-534.
SUN Y H, ZHANG C G, LIU Y Z, et al. Characteristics of temperature change and its response to ENSO events in Henan Province during 1970—2019 [J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 36(4): 528-534.
- [19] 彭霞, 郭冰瑶, 魏宁, 等. 近 60a 长三角地区极端高温事件变化特征及其对城市化的响应[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(12): 1917-1926.
PENG X, GUO B Y, WEI N, et al. Characteristics of extreme heat events variations and their response to urbanization in Yangtze River Delta region in recent sixty years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(12): 1917-1926.
- [20] ZHANG P F, REN G Y, QIN Y, et al. Urbanization effects on estimates of global trends in mean and extreme air temperature[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(5): 1923-1945.
- [21] 周中元, 王涛, 陈玉壮, 等. 南水北调中线工程沿线寒潮及区域极端低温时空变化规律[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(6): 1098-1108.
ZHOU Z Y, WANG T, CHEN Y Z, et al. Spatiotemporal variations of cold waves and regional extreme low temperature along the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(6): 1098-1108.
- [22] 张志昊, 李晓兵, 张鹏, 等. 大渡河流域极端气温时空分布特征研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(9): 10-25.
ZHANG Z H, LI X B, ZHANG P, et al. Study on the spatiotemporal distribution characteristics of extreme temperature indices in Dadu River Basin [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(9): 10-25.
- [23] 吴光伟, 常允新, 王庆兵, 等. 近 55 年来山东省极端气温事件时空分布特征[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(2): 19-32.
WU Guangwei, CHANG Yunxin, WANG Qingbing, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of extreme temperature events in Shandong Province in recent 55 years [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(2): 19-32.
- [24] LI B H, LIU K, WANG M, et al. Future global population exposure to record-breaking climate extremes[J]. *Earth's Future*, 2023, 11(11): e2023EF003786.
- [25] MASSELOT P, MISTRY M N, RAO S, et al. Estimating future heat-related and cold-related mortality under climate change, demographic and adaptation scenarios in 854 European cities [J]. *Nature Medicine*, 2025, 31(4): 1294-1302.
- [26] 刘玄, 唐培军, 吴同帅, 等. 山东省极端气候指数变化特征研究[J]. *水利水电工程学报*, 2022(2): 40-50.
LIU X, TANG P J, WU T S, et al. Study on the characteristics of extreme climate indices in Shandong Province[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(2): 40-50.
- [27] 吴光伟, 常允新, 王庆兵, 等. 近 55 年来山东省极端气温事件时空分布特征[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(2): 19-32.
WU G W, CHANG Y X, WANG Q B, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of extreme temperature events in Shandong Province in recent 55 years [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(2): 19-32.
- [28] 刘珊珊, 刘布春, 刘园, 等. CMIP6 全球气候模式对山东极端气温模拟能力评估[J]. *中国农业气象*, 2024, 45(1): 91-100.
LIU S S, LIU B C, LIU Y, et al. Assessment of extreme temperature simulation ability of CMIP6 global climate model in Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2024, 45(1): 91-100.
- [29] PETERSON T C, MANTON M J. Monitoring changes in climate extremes: a tale of international collaboration [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(9): 1266.
- [30] JONES B, O'NEILL B C, MCDANIEL L, et al. Future population exposure to US heat extremes[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(7): 652-655.
- [31] 胡彩虹, 王纪军, 王民, 等. 流域水文过程对极端气候事件敏感性研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.

- HU C H, WANG J J, WANG M, et al. Sensitivity Study on Watershed Hydrological Procedure to Climate Extreme Events [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015.
- [32] 环海军, 徐玮平, 刘岩, 等. 山东高温天气分布及变化特征[J]. 干旱气象, 2025, 43(1): 64-75.
- HUAN H J, XU W P, LIU Y, et al. Distribution and variation characteristics of high temperature weather in Shandong[J]. Journal of Arid Meteorology, 2025, 43(1): 64-75.
- [33] 卢珊, 胡泽勇, 沈姣姣, 等. 近62年我国极端高温事件的时空变化特征[J]. 高原气象, 2025, 44(1): 201-213.
- LU S, HU Z Y, SHEN J J, et al. Spatio-temporal variations of extreme heat events over China in recent 62 years [J]. Plateau Meteorology, 2025, 44(1): 201-213.
- [34] 焦文慧, 张勃, 马彬, 等. 近58 a中国北方地区极端气温时空变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1220-1230.
- JIAO W H, ZHANG B, MA B, et al. Temporal and spatial changes of extreme temperature and its influencing factors in northern China in recent 58 years [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1220-1230.
- [35] ROGERS J S, MANETA M P, SAIN S R, et al. The role of climate and population change in global flood exposure and vulnerability[J]. Nature Communications, 2025, 16: 1287.
- [36] SCHILLERBERG T A, TIAN D. Global assessment of compound climate extremes and exposures of population, agriculture, and forest lands under two climate scenarios [J]. Earth's Future, 2024, 12(9): e2024EF004845.
- [37] JERRETT M, CONNOLLY R, GARCIA-GONZALES D A, et al. Climate change and public health in California: a structured review of exposures, vulnerable populations, and adaptation measures [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(32): e2310081121.
- [38] 陈思达, 刘凯, 李博浩, 等. 中国脱贫县破纪录极端天气事件研究[J/OL]. 气候变化研究进展, 2025: 1-13. [2025-03-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5368.P.20250321.1551.002.html>.
- CHEN S D, LIU K, LI B H, et al. The analysis of record-breaking probability of extreme weather in China's poverty-alleviated counties [J/OL]. Climate Change Research, 2025: 1-13. [2025-03-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5368.P.20250321.1551.002.html>.

(责任编辑 王海锋)