孙周亮，席慧，朱明娟，等. 全球变暖与城镇化背景下极端气候演变及归因分析：基于宿迁市 1955—2024 年观测数据[J]. 水利水电技术(中英文)，2026，57(8)：26-48. DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 08. 003
SUN Zhouliang，XI Hui，ZHU Mingjuan，et al. Evolution and attribution analysis of extreme climate under global warming and urbanization：based on observed data from Suqian City during 1955—2024[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2026，57(8)：26-48. DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 08. 003

全球变暖与城镇化背景下极端气候演变及归因分析：基于宿迁市 1955—2024 年观测数据

孙周亮[1,2,3]，席　慧[1,2,3]，朱明娟[4]，方　琼[4]，李英睿[1,2,3]，王　敏[1,2,3]，李　涛[1,2,3]

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院，河南 郑州　450003；2. 水利部黄河重点实验室，河南 郑州　450003；3. 河南省智慧水利工程技术中心，河南 郑州　450003；4. 宿迁市水利局，江苏 宿迁　223800)

摘　要：【目的】揭示南北气候过渡带城市极端气候演变规律，为宿迁市防灾减灾、水资源调度与气候韧性建设提供科学支撑。【方法】采用宿迁 4 个气象站 1955—2024 年逐日气温、降水观测数据，依托线性趋势分析、Mann-Kendall 检验、去趋势预置白 MK 检验、Pettitt 突变检验识别气候序列演变特征；构建 44 项极端气候指标体系，刻画极端降水、极端气温、复合极端事件演变规律；借助偏相关分析、逐步回归、分段多元回归、分层方差分解量化全球变暖、大气环流、城镇化三类驱动因子的作用强度。【结果】近 70 年区域年降水总量无显著趋势与突变，降水结构发生一定转型：中雨频次减少，暴雨、短时极端降水、夜间降水占比持续上升，降水趋于短时均匀分布；年均气温以 0. 28～0. 38 ℃/10 a 速率极显著升高，1993 年全域同步发生均值突变，呈现昼夜不对称增温特征，夜间低温升温速率显著高于日间，气温日较差持续收窄，冷事件衰减幅度远超暖事件增长幅度；干热、干冷为主要复合极端类型，暖湿、冷湿事件发生频次极低，气候风险逐步由冷干主导转向暖干主导；方差分解结果显示全球变暖独立方差解释占比 23. 2%，大尺度环流、局地城镇化独立贡献分别为 3. 1%、8. 8%，多因子耦合交互可解释 13. 4%气温变异；分段回归结果显示高速城镇化会削弱环流与全球变暖的局地气候响应，城镇化无独立显著线性升温效应。【结论】1955—2024 年宿迁气候发生转型，昼夜不对称增温、降水极端化、复合风险暖干化为三大核心特征。全球变暖主导区域气温变化，城镇化仅通过长期累积作用改变气候状态，边际升温效应不显著。相关结论可为南北气候过渡带同类城市气候适应、灾害防控提供参考。

关键词：降水结构转型；昼夜不对称增温；极端气候；复合极端事件；宿迁市；南北气候过渡带；气候归因；降雨

DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 08. 003　　**开放科学(资源服务)标志码(OSID)**：

中图分类号：TV213　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0860(2026)08-0026-23

听语音　与作者互动　聊科研

收稿日期：2026-05-15；**修回日期**：2026-07-12；**录用日期**：2026-07-13；**网络出版日期**：2026-07-17

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC3209203，2023YFC3209305)；青海省基础研究计划项目(2025-ZJ-721)；河南省自然科学基金项目(252300423358)；黄河水利科学研究院基本业务项目(HKY-JBYW-2024-12，HKY-YF-2024-05，HKY-JBYW-2025-17)；海绵城市河道智能调度系统项目(E3213010313202305120-1)

作者简介：孙周亮(1993—)，男，工程师，博士，主要从事水文水资源方面的研究。E-mail：zlsun17@ 163. com

通信作者：李　涛(1978—)，男，正高级工程师，博士，主要从事水利信息化研究。E-mail：lemonlls@ 163. com

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

Evolution and attribution analysis of extreme climate under global warming and urbanization: based on observed data from Suqian City during 1955—2024

SUN Zhouliang[1,2,3], XI Hui[1,2,3], ZHU Mingjuan[4], FANG Qiong[4], LI Yingrui[1,2,3], WANG Min[1,2,3], LI Tao[1,2,3]

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, Henan, China; 2. Key Laboratory of Yellow River, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, Henan, China; 3. Henan Smart Water Conservancy Engineering Technology Center, Zhengzhou 450003, Henan, China; 4. Suqian Water Conservancy Bureau, Suqian 223800, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] The evolution patterns of extreme climate in cities within the north-south climate transition zone are revealed, thereby providing scientific support for disaster prevention and mitigation, water resources regulation, and climate resilience construction in Suqian City. [Methods] Daily temperature and precipitation observation data from four meteorological stations in Suqian during 1955—2024 were used. Linear trend analysis, the Mann-Kendall test, the trend-free pre-whitening MK test, and the Pettitt abrupt change test were applied to identify evolution characteristics of climatic series. A system consisting of 44 extreme climate indicators was constructed to analyze evolution patterns of extreme precipitation, extreme temperature, and compound extreme events. Partial correlation analysis, stepwise regression, piecewise multiple regression, and hierarchical variance decomposition were used to quantify the effects of three driving factors, namely, global warming, atmospheric circulation, and urbanization. [Results] Over the past 70 years, no significant trend or abrupt change was detected in annual total precipitation, while a remarkable transformation was observed in precipitation structure. The frequency of moderate rainfall events decreased, and the proportions of rainstorms, short-duration extreme precipitation, and nighttime precipitation continuously increased, leading to shorter and more evenly distributed precipitation processes. The annual average temperature increased extremely significantly at a rate of 0.28~0.38 ℃ per decade, and consistent abrupt changes occurred across the whole study area in 1993. Diurnal asymmetric warming characteristics were observed. The warming rate of nighttime low temperature was significantly higher than that of daytime temperature, and the diurnal temperature range was continuously reduced. The reduction in cold events was far greater than the increase in warm events. Dry-warm and dry-cold compound extreme events were dominant, while warm-wet and cold-wet events occurred at very low frequencies, indicating a shift in climate risk from cold-dry dominance to warm-dry dominance. According to variance decomposition result , an independent variance contribution of 23.2% was obtained for global warming, and independent contributions of 3.1% and 8.8% were obtained for large-scale atmospheric circulation and local urbanization, respectively. A total of 13.4% of temperature variation was explained by multi-factor coupling interaction. Piecewise regression result showed that the local response intensity of regional climate to atmospheric circulation and global warming was weakened by rapid urbanization, and no significant linear warming effect was detected for urbanization. [Conclusion] A systematic transformation of climate features is identified in Suqian during 1955—2024, with diurnal asymmetric warming, intensified extreme precipitation, and warm-dominated compound climate risks as the three core characteristics. Global warming dominates regional temperature variations. Urbanization alters climate conditions only through long-term cumulative effects, whereas its marginal warming effect is insignificant. The findings can provide a reference for climate adaptation and disaster prevention in similar cities within the north-south climate transition zone.

Keywords: precipitation structure transformation; diurnal asymmetric warming; extreme climate; compound extreme events; Suqian City; north-south climate transition zone; climate attribution; rainfall

0 引 言

全球气候变暖背景下，极端气候事件频发、多发、重发已成为当前全球气候变化最突出的特征之一，深刻威胁区域水资源安全、生态系统稳定与经济社会可持续发展[1-3]。IPCC 第六次评估报告指出[4]，近百年来全球地表平均气温持续上升，极端高温、短时强降水、持续性干旱等事件的发生频次、强度与持续时间均呈现显著上升趋势，气候系统的不稳定性与极端化特征不断加剧[5-6]。这表明全球变暖已从平均态升温，逐步转向极端事件频发的非线性响应阶段，而不同区域受地理位置、大气环流、下垫面条件的综合影响，气候系统对全球变暖的响应表现出显著的空间异质性。

我国地域辽阔，气候类型复杂多样，全国整体气候变暖趋势与全球变化步调一致，极端气候事件的发生风险整体上升[7-8]。同时，气候变化在不同区域、不同季节呈现出明显的分异规律[9-10]。我国东部季风区人口集聚、产业密集、水系发达，既是社会经济发展的核心区域，也是旱涝、高温、寒潮等气象灾害的高发区，对局地气候变化与极端事件的响应更为敏感[11-12]。因此，厘清东部季风区极端气候的时空演变规律、识别其驱动机制，已成为国内气候变化领域的核心研究方向之一[13]。

随着城市发展进程加快，人类活动对局地气候的扰动持续增强，城市尺度极端气候变化逐渐成为学界关注的重点领域[14-17]。目前国内已有大量研究针对不同市域开展极端气候演变分析，相关成果覆盖安康[18]、丽江[19]、温州[20]、大连[21]、哈密[22]、拉萨[23]等不同气候区城市。综合现有研究可知，我国城市极端气候变化存在共性与区域差异并存的特征：全国多数城市普遍呈现气温升高、极端降水强度增大的整体趋势，但受区域气候背景、地形地貌、城镇化水平、水系分布等因素影响，不同城市在降水结构演变、昼夜增温差异、极端事件组合形态等方面存在明显区别。气温普遍增暖、极端降水贡献占比提升的同步变化特征，也反映出全球变暖与局地城市化叠加背景下，城市极端气候演变的普遍性规律。

秦岭—淮河一线是我国划分南北方气候的重要地理界线，该过渡带兼具暖温带与亚热带双重气候属性，大气环流复杂，冷暖空气交汇频繁，降水时空分布不均，气温年际波动剧烈，是我国气候变化响应的敏感区域[24-25]。宿迁市地处江苏省北部、淮河下游，位于南北气候过渡带的核心位置，属于暖温带半湿润季风气候，四季分明、雨热同期[26]。市域内河网密布，洪泽湖、骆马湖等大型天然湖泊镶嵌其中，形成了“平原+河湖”的特殊下垫面组合，也是江淮平原典型的生态脆弱区与气候敏感区[27]。特殊的地理位置与局地环境，使得宿迁气候同时受到东亚夏季风、冬季风、梅雨锋、江淮气旋等多重大气系统的共同调控，气候要素年际变率大，高温、寒潮、暴雨、干旱等气象灾害交替发生[28-29]，不仅对区域农业生产、水资源配置、防洪减灾体系形成长期挑战，也使其成为开展南北过渡带气候响应研究的典型区域。

近年来，国内外学者针对江淮流域、江苏省域尺度的气候变化开展了大量工作，取得了较为丰富的研究成果[30-32]。已有研究证实，江淮地区冷类极端气温指标整体下降、暖类指标持续上升[33]，极端降水强度有所增大，小雨事件逐步减少[30,34]；江苏省整体亦呈现气温升高、降水格局重构的变化特征[35]。但现有研究仍存在明显短板：多数研究聚焦于大尺度流域、省级行政区等宏观范围[36-40]，针对宿迁这类过渡带中小城市的精细化长序列研究相对匮乏；已有成果多单独分析气温或降水单一气象要素的变化规律[41-43]，缺少对多等级降水、多维度极端气温、复合极端事件的系统性整合分析[44]，未能构建从单一要素到多要素协同、从平均态到极端态、从独立事件到复合事件的完整分析框架；第三，针对宿迁本地气候的研究，尚未充分挖掘区域独有特征，对于昼夜不对称增温、降水夜间化、干湿复合极端事件转型等局地典型规律解析不足，现有结论难以支撑地方水资源管理、城市防灾、气候适应等精细化决策需求。

基于上述研究背景与现存不足，本文以南北气候过渡带典型城市宿迁市为研究区，相较于以往针对宿迁的短期序列、单一要素研究，本研究采用 1955—2024 年近 70 年长序列逐日气象观测数据，时间跨度更长、数据连续性更强。研究构建涵盖降水、气温、夜间降水、复合极端事件的多维度极端气候指标体系，弥补了本地研究对夜间降水、复合极端气候关注不足的短板，系统剖析区域极端气候多尺度演变规律。选取多类极端气温、极端降水及复合极端气候指标，系统开展区域极端气候多尺度演变特征分析。在此基础上，结合大气环流指数、全球温度序列、城镇化数据，运用多种统计方法开展定量归因，区分全球变暖、大尺度环流、局地城镇化三大因子的独立贡献与耦合作用，阐明区域气候特征转型的核心驱动机制。本研究立足南北气候过渡带中小城市尺度开展精细化分析，成果一方面可为宿迁市水资源优化调度、防洪抗旱、农业气候资源利用、城市气候韧性建设提供数据支撑与科学依据；另一方面，也可为秦岭—淮河南北气候过渡带同类城市的气候变化研究、气候灾害防控提供参考与借鉴。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

宿迁市地处江苏省北部(见图 1)，介于北纬 33°08′—34°25′、东经 117°56′—119°10′之间，位于秦岭—淮河气候过渡带，属暖温带半湿润季风气候区，四季分明，雨热同期，是江淮平原典型的季风气候敏感区[45]。区域内降水时空分布不均，年际波动大，气温受季风环流与局地下垫面变化影响显著，同时作为江淮地区洪涝与干旱灾害的高频发区[46]，其

气候变化特征对区域水资源管理、农业生产与防洪减灾具有重要影响。

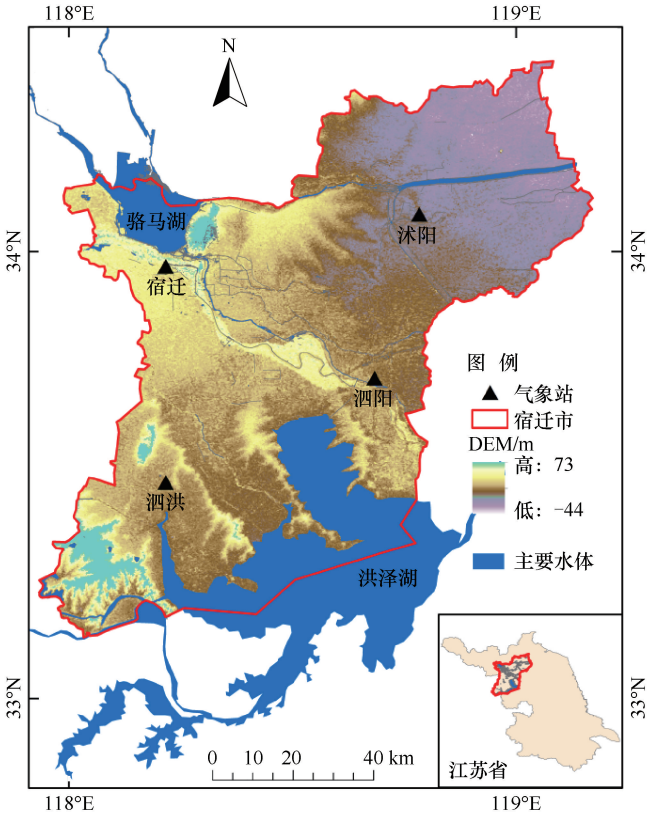


图 1　研究区概况

Fig. 1　Overview of study area

研究区地势低平，河网密布，洪泽湖、骆马湖等大型湖泊分布其中，水系复杂，水文过程对气候变化的响应极为敏感。同时，宿迁市处于南北气候过渡带，夏季风年代际波动、梅雨锋与江淮气旋的活动变化，均会对区域降水过程产生影响，尤其是短时强降水、夜间暴雨等极端事件方面；冬季风强度的减弱，则推动了区域夜间气温快速增温、寒潮事件持续时间缩短等不对称增温特征的形成[47]。

1.2　主要数据来源

本研究选用宿迁市沭阳、宿迁、泗阳、泗洪 4 个国家基本气象站观测数据(站点分布见图 1)，数据来源于国家气象科学数据中心。站点空间上均匀覆盖宿迁市 4 个主要城镇，各站始建于 1955—1959 年，可较好反映近 70 年(1955—2024 年)的气候变化特征。各站数据要素均包括日降水、夜间降水、日间降水、日平均温度、日最高温度、日最低温度。数据经过国家气象信息中心质量控制，对个别缺测值采用线性插值法补全，确保数据序列的完整性与可靠性。因数据序列较长，为消除因迁站、仪器更换、观测制度调整等人为因素影响，采用惩罚最大 F 检验方法(PMFT)[48]开展均一化检验与校正，检验结果显示各站降水、气温序列均通过了均一化检验，未检测出显著间断点，原始观测序列可反映真实气候信号。

驱动因子分为大尺度气候因子与人为活动因子两类，大气环流指数选取太平洋年代际振荡指数(PDO)、北大西洋涛动指数(NAO)、东亚夏季风指数(EASMI)、东亚冬季风指数(EAWMI)、西太平洋遥相关指数(WP)、海洋尼诺指数(ONI，ENSO 类指数)，数据来自美国海洋和大气管理局(NOAA，Monthly Climate/Ocean Indices (Time-Series)：NOAA Physical Sciences Laboratory)；全球变暖背景选用 NASA GISS(Goddard Institute for Space Studies，GISS)发布的 GISTEMP v4 全球地表温度距平年值数据(https：//data. giss. nasa. gov/gistemp/)；人为因子选取宿迁市逐年城镇化率，数据源自宿迁市统计局历年《宿迁统计年鉴》(https：//www. suqian. gov. cn/cnsq/xxgktjnj/xxgk_ list. shtml)。所有外源因子均统一处理为年值序列，与气象观测数据时间尺度匹配。

1.3　主要方法

1.3.1　主要分析方法

本文研究方法分为气候序列特征识别与多驱动因子定量归因两部分，显著性检验统一采用 $\alpha=0.05$。

气候序列特征识别综合采用线性趋势、Mann-Kendall 趋势检验(MK)、去趋势预置白 MK 趋势检验(TFPW)、Pettitt 突变检验、信息熵(IE)等方法[49-51]。其中线性趋势用于量化气候要素长期线性倾向速率；传统 Mann-Kendall 检验易因序列自相关性造成显著性失真，本研究引入去趋势预置白法规避序列自相关干扰，提升趋势检验可信度，相应判断阈值为±1.96；Pettitt 突变检验法用于检验气候指标在不同时期均值发生突变的显著性，信息熵法定量表征气候序列年际波动无序程度与复杂度，反映区域气候年际变率强弱。

多驱动因子定量归因采用偏相关分析、逐步回归、分段多元回归、方差分解等统计方法[52]，剥离不同驱动因子间耦合干扰，定量区分全球变暖、大气环流、城镇化对局地气候的独立贡献。首先通过偏相关分析计算单一驱动与气候要素的独立相关系数及显著性，然后采用逐步回归筛选出统计显著的核心驱动因子，构建最优多元线性回归模型；以突变年份为分界开展分段多元回归，分城镇化低速、高速两个阶段建模，对比不同时期全球变暖、大气环流、城镇化的驱动强度差异；采用残差分离法，以显著环流指数与

全球变暖序列构建自然气候背景模型，剥离大尺度气候信号，得到仅由城镇化引发的局地升温残差序列；最后开展三分组方差分解，将驱动划分为全球变暖、大尺度环流、局地城镇化三类，定量计算各类因子独立方差贡献、多因子耦合交互项与未解释残差，定量区分不同驱动的贡献占比。

1.3.2 极端气候指标

参照世界气象组织推荐的多种极端气候指数、国家标准《降水量等级》(GB/T 28592—2012)及已有研究[38,53]，结合研究区气候特征，并从干湿、冷热角度构建复合极端气候指标，形成适用于研究区的极端气候指标体系(见表 1)，以期从多角度分析研究区极

表 1 极端气候指标及定义

Table 1 Extreme climate indices and their definitions

分 类	指数名称	简写符号	定 义	单 位
降水绝对阈值指标	中雨雨量	R10	年内降水超过 10 mm 的降水总量	mm
	中雨日数	R10D	年内降水超过 10 mm 的日数	d
	中雨占比	R10r	年内降水超过 10 mm 的降水占比	%
	大雨雨量	R25	年内降水超过 25 mm 的降水总量	mm
	大雨日数	R25D	年内降水超过 25 mm 的日数	d
	大雨占比	R25r	年内降水超过 25 mm 的降水占比	%
	暴雨雨量	R50	年内降水超过 50 mm 的降水总量	mm
	暴雨日数	R50D	年内降水超过 50 mm 的日数	d
	暴雨占比	R50r	年内降水超过 50 mm 的降水占比	%
	最大 1 d 降水	Rx1d	年内 1 日最大降水总量	mm
	最大 3 d 降水	Rx3d	年内 3 日最大降水总量	mm
	最大 5 d 降水	Rx5d	年内 5 日最大降水总量	mm
降水百分位阈值指标	强降水量	R95p	日降水超过 95%分位值阈值降水总量	mm
	强降水日数	R95D	日降水超过 95%分位值阈值的日数	d
	极强降水量	R99p	日降水超过 99%分位值阈值降水总量	mm
	极强降水量日数	R99D	日降水超过 99%分位值阈值的日数	d
夜间降水指标	夜雨贡献率	NRr	夜间降水量占比	%
	夜间大雨量	NR15	20 时—次日 8 时降雨达到 15 mm 的降雨总量	mm
	夜间大雨日数	NR15D	20 时—次日 8 时降雨达到 15 mm 的降雨日数	d
	夜间暴雨量	NR30	20 时—次日 8 时降雨达到 30 mm 的降雨总量	mm
	夜间暴雨日数	NR30D	20 时—次日 8 时降雨达到 30 mm 的降雨日数	d
降水持续性指标	最大连续无雨日数	CDD	日降水小于 1 mm 的最大连续日数	d
	最大连续降水日数	CWD	日降水大于 1 mm 的最大连续日数	d
降水强度指标	大雨平均雨强	SD25	日降雨 25 mm 以上大雨总量/大雨日数	mm/d
	强降雨平均雨强	SD95p	超过 95%分位值阈值日降雨的平均雨强	mm/d
温度绝对阈值指标	年最高温度	TX	日均温度的最大值	℃
	年最低温度	TN	日均温度的最小值	℃
	白天极端高温	TXx	日最高气温的最大值	℃
	夜间极端低温	TNn	日最低气温的最小值	℃
温度百分位阈值指标	冷昼日数	TX10p	日最高气温小于 10%分位值的日数	d
	冷夜日数	TN10p	日最低气温小于 10%分位值的日数	d
	暖昼日数	TX90p	日最高气温大于 90%分位值的日数	d
	暖夜日数	TN90p	日最低气温大于 90%分位值的日数	d
冷热气温指标	夏日指数	SU	日最高温度大于 25℃的日数	d
	炎热指数	TR	日最低温度大于 25 ℃的日数	d
	霜冻指数	FD	日最低温度小于 0 ℃的日数	d
	冰冻日数	ID	日最高温度小于 0 ℃的日数	d
	年均日较差	DTR	年内日最高温-日最低温的均值	℃
温度持续性指标	最大热日持续日数	*WSDI*	连续 6 天以上日最高温大于 90%分位值的最大连续日数	d
	最大冷日持续日数	*CSDI*	连续 6 天以上日最低温小于 10%分位值的最大连续日数	d
复合气候指标	暖湿事件	WW	连续 3 天以上降雨大于 1 mm 且最高温大于 90%分位值总日数	d
	干热事件	WD	连续 3 天以上降雨小于 0.1 mm 且最高温大于 90%分位值总日数	d
	冷湿事件	CW	连续 3 天以上降雨大于 1 mm 且最低温小于 10%分位值总日数	d
	干冷事件	CD	连续 3 天以上降雨小于 0.1 mm 且最低温小于 10%分位值总日数	d

端气候变化规律。各类极端气候指标包括绝对阈值、百分位阈值、昼夜差异、持续性、强度、复合气候等，合计 10 类 44 项。

2 结果与分析

2.1 降水、气温年际变化

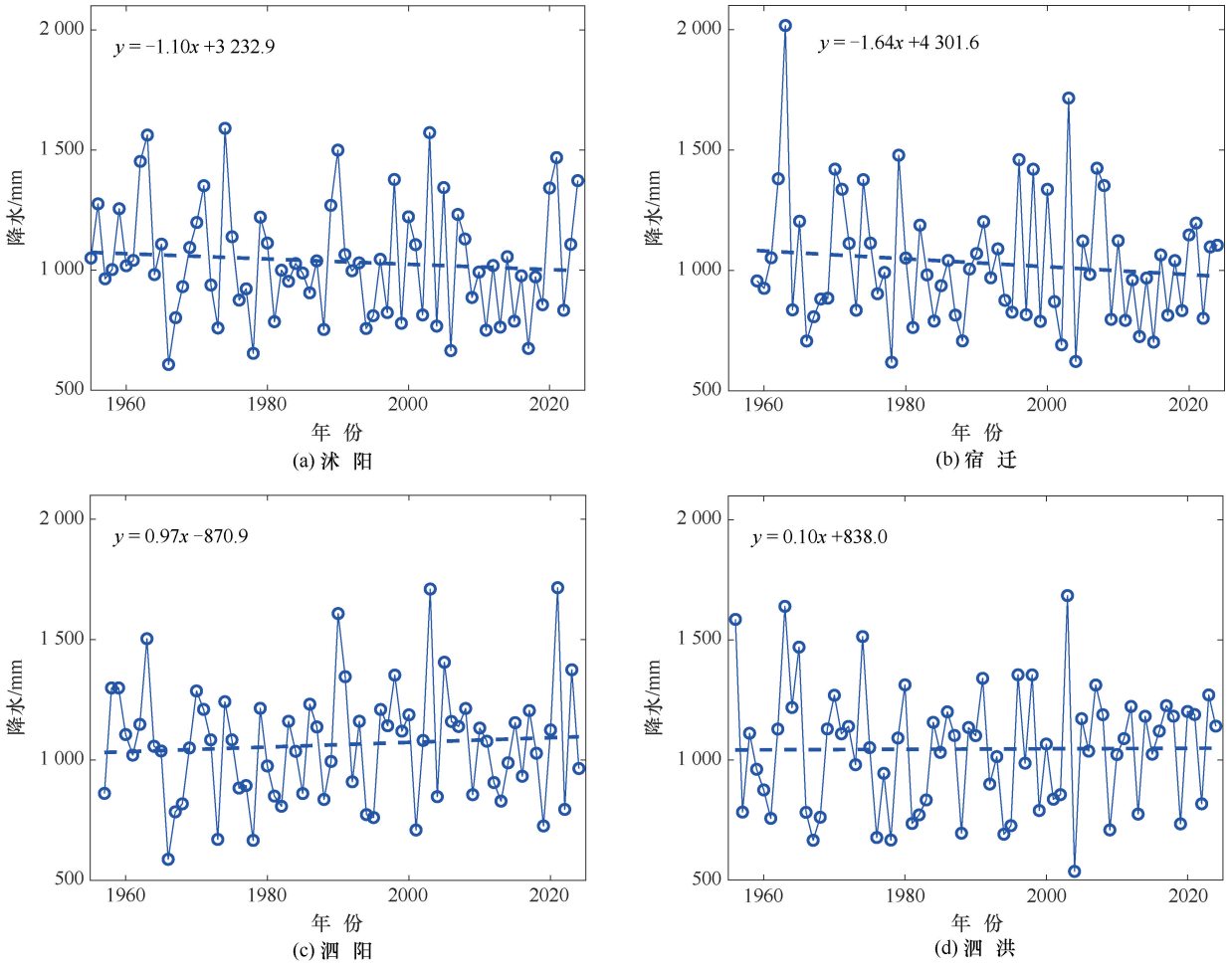
研究区 4 站年总降水量、年均气温变化过程如图 2 和图 3 所示，趋势与突变显著性检验如表 2 所列，其中 Pettitt 检验中括号内为突变年份。近 70 年来宿迁地区年降水总量保持平稳，未出现显著的线性趋势或均值突变；而气温则呈现一致的、极显著的上升态势。各站降水变化呈小幅度变化，其中，沭阳、宿迁站呈轻微减小趋势，泗阳、泗洪站呈轻微增加趋势，各站年降水量变化速率介于−1.6～1.0 mm/a，MK 与 TFPW 趋势检验值(−1.02～0.95)均未通过显著性检验。Pettitt 突变检验亦无显著断点，表明近 70 年各站降水未发生显著性均值突变，IE 法也未检验出显著性年际波动突变。

对于气温，4 站升温率在 0.28～0.38 ℃/10 a 之间，MK 检验值在 6.52～7.47 之间，均远高于临界值 1.96(α=0.05)，表明存在极显著的增加趋势，并于 1993 年发生同步均值突变(p<0.001，见表 2)。

基于各站降水和气温变化情况，气温采用 1992 年之前的逐日序列计算 TX10、TX90、TN10、TN90；因未检测到降水显著突变点，采用全部序列计算 P95、P99，结果如图 4 所示。各站强降水阈值(P95)约为 35.6～40.0 mm，极强降水阈值(P99)达 75.9～90.0 mm，分别已达到大雨和暴雨等级，可以代表极端降水特征。TN10 约为−4.7～−2.8 ℃，TN90 约为 22.8～23.5 ℃，各站多年平均 TX 为 19.5～19.9 ℃、TN 为 9.7～10.8 ℃，因此气温百分位阈值可分别表示冷暖特征。

2.2 极端降水指数变化

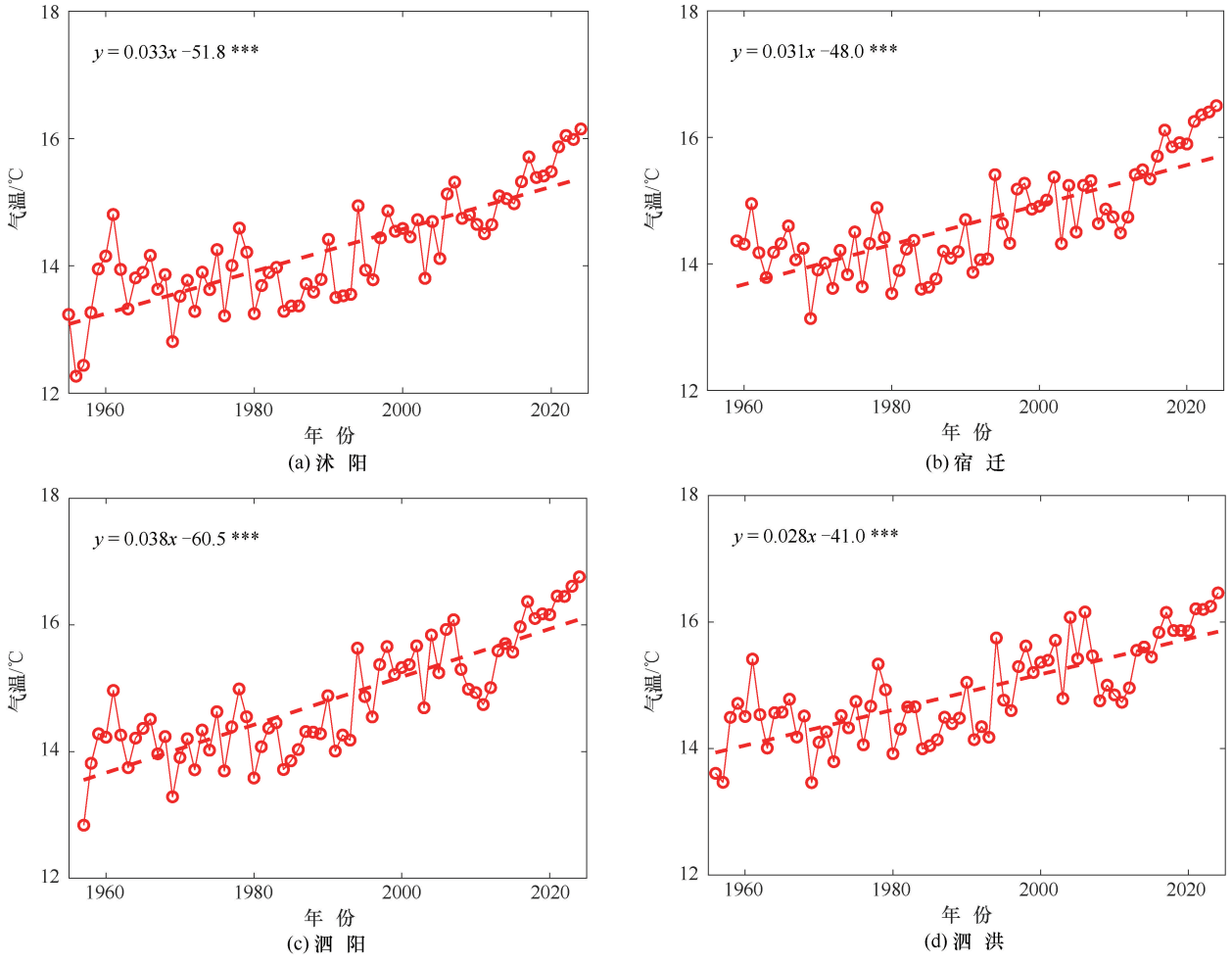
整体来看，在年降水总量未发生显著变化的前提



图中 *、**、***分别表示趋势线达到 0.05、0.01、0.001 显著性，无标记则未达到 0.05 显著性

图 2 降水年际变化过程

Fig. 2 Interannual variations in precipitation



图中 * 、**、***分别表示趋势线达到 0.05、0.01、0.001 显著性，无标记则未达到 0.05 显著性

图 3 气温年际变化过程

Fig. 3 Interannual variations in air temperature

表 2 降水、气温年际变化显著性检验(括号内为突变年份)

Table 2 Significance test of interannual variations in precipitation and air temperature

站 点	年降水量				年均气温			
	MK	TFPW	Pettitt	IE	MK	TFPW	Pettitt	IE
沭 阳	−0.90	−1.02	0.75	—	7.16	7.66	4×10^{-9}(1993 年)	—
宿 迁	−0.64	−0.67	1.14	—	6.52	7.30	2×10^{-9}(1993 年)	—
泗 阳	0.13	0.02	1.14	—	7.47	8.02	1×10^{-10}(1993 年)	—
泗 洪	0.67	0.95	1.00	—	6.77	6.79	1×10^{-9}(1993 年)	—

下，区域降水结构发生一定变化(见表 3—表 5)，表现为“中雨减弱、暴雨与短时极端降水增强、降水过程趋于均匀化”的转型特征，整体以波动变化为主。

不同等级降水呈现空间分异与趋势分化(见表 3，表中数值表示线性倾向率 K，下同)。中雨事件(R10、R10D)各站一致呈下降趋势；大雨事件则表现出“北降南升”的空间格局；暴雨事件(R50、R50r)整体以上升为主，其中泗洪站增幅显著(1.79 mm/a，$p<0.05$)。

表 4 中短历时与极端强度降水增强趋势明显。单日最大降水 Rx1d 及 Rx3d 在各站均为正倾向，南部增幅显著高于北部(泗洪站 Rx1d 达 0.70 mm/a，$p<0.01$)；百分位极端降水(R95p、R99p)微弱增加但相应频次基本稳定。

由表 5 可知降水整体过程呈现“碎片化”与夜间化趋势：连续干湿时长 CDD 与 CWD 同步缩短，年内降水分布更均匀；夜雨贡献率 NRr 与夜间暴雨

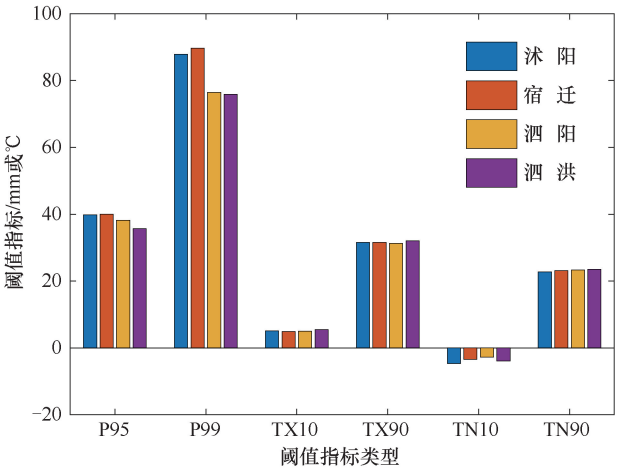


图 4　降水、气温相关百分位极端阈值

Fig. 4　Extreme percentile thresholds for precipitation and air temperature

NR30 整体呈上升趋势，自北向南增幅递增，泗洪夜间暴雨趋势显著，区域降水风险向短时高强度夜间暴雨转变。

2.3　极端气温指数变化

极端气温变化结果表明，区域增温并非均一过程，而是呈现出典型的“昼夜不对称”特征：夜间增温速率远超白天，达白天气温 1.5～2 倍，导致日较差持续收窄，且冷事件的减幅显著大于暖事件的增幅。

图 5—图 9 为研究区日内最高温与最低温特征变化(图中 K 值为线性倾向率，下同)。各站最低气温 TN 升温率(0.3～0.5 ℃/10a)显著高于最高气温 TX(0.11～0.34 ℃/10a)，极端低温 TNn 增幅(0.44～0.77 ℃/10a)亦远超极端高温 TXx。受此影响，气温日较差 DTR 均显著下降。

图 10—图 17 为各站极端冷、热事件变化。从极端事件频率看，冷事件的大幅减少信号最显著：冷夜日数 TN10p 减幅(0.37～0.54 d/a)高于冷昼 TX10p(0.25～0.29 d/a)；而暖夜日数 TN90p 增幅(0.16～0.24 d/a)亦高于暖昼 TX90p(0～0.14 d/a)。霜冻日数 FD 与冰冻日数 ID 的下降速率(0.52～0.70 d/a)亦远超夏日指数 SU 与炎热指数 TR 的增幅。

图 18 和图 19 为极端气温持续性特征，冷持续日数 *CSDI* 显著缩短(降幅 0.15～0.21 d/a)，约近 10 年来，多数年份为 10 d 以下；而热浪持续日数 *WSDI* 仅

表 3　不同等级降水绝对阈值指标变化

Table 3　Variations in absolute threshold indicators for precipitation of different grades

站　点	R10	R10D	R10r	R25	R25D	R25r	R50	R50D	R50r
沭　阳	−0.37	0	0.01	−0.13	0	0.002	0.27	0	0.07
宿　迁	−0.48	−0.02	−0.02	0.32	0	0.04	−0.05	0	0.02
泗　阳	−0.24	−0.02	−0.03	0.45	0	0.04	0.74	0	0.05
泗　洪	−0.83	−0.06	−0.11	0.96	0.03	0.09	1.79*	0	0.15*

注：“*”、“**”、“***”分别表示趋势达到 0.05、0.01、0.001 显著性水平。下同。

表 4　极端降水百分位阈值指标变化

Table 4　Variations in percentile threshold indicators for extreme precipitation

站　点	Rx1d	Rx3d	Rx5d	R95p	R95D	R99p	R99D
沭　阳	0.36	−0.02	−0.02	0.25	0	0	0
宿　迁	0.22	0.23	0.14	0.26	0	0	0
泗　阳	0.25	0.08	−0.08	1.62	0	0.65	0
泗　洪	0.70**	0.73*	0.24	2.64*	0.02	0.77*	0

表 5　夜间降水、持续性降水、降水强度指标变化

Table 5　Variations in indicators for nighttime precipitation, persistent precipitation, and precipitation intensity

站　点	NRr	NR15	NR15D	NR30	NR30D	CDD	CWD	SD25	SD95p
沭　阳	0.06	−0.23	0	0.20	0	−0.07	−0.03***	0.05	0.17
宿　迁	0.09*	0.41	0	0.25	0	0	−0.03***	−0.03	0.08
泗　阳	0.05	0.29	0	1.20	0	−0.15*	0.03**	0.05	0.02
泗　洪	0.10	0.17	0	1.96*	0.03*	−0.07	−0.05***	0.06	0.08

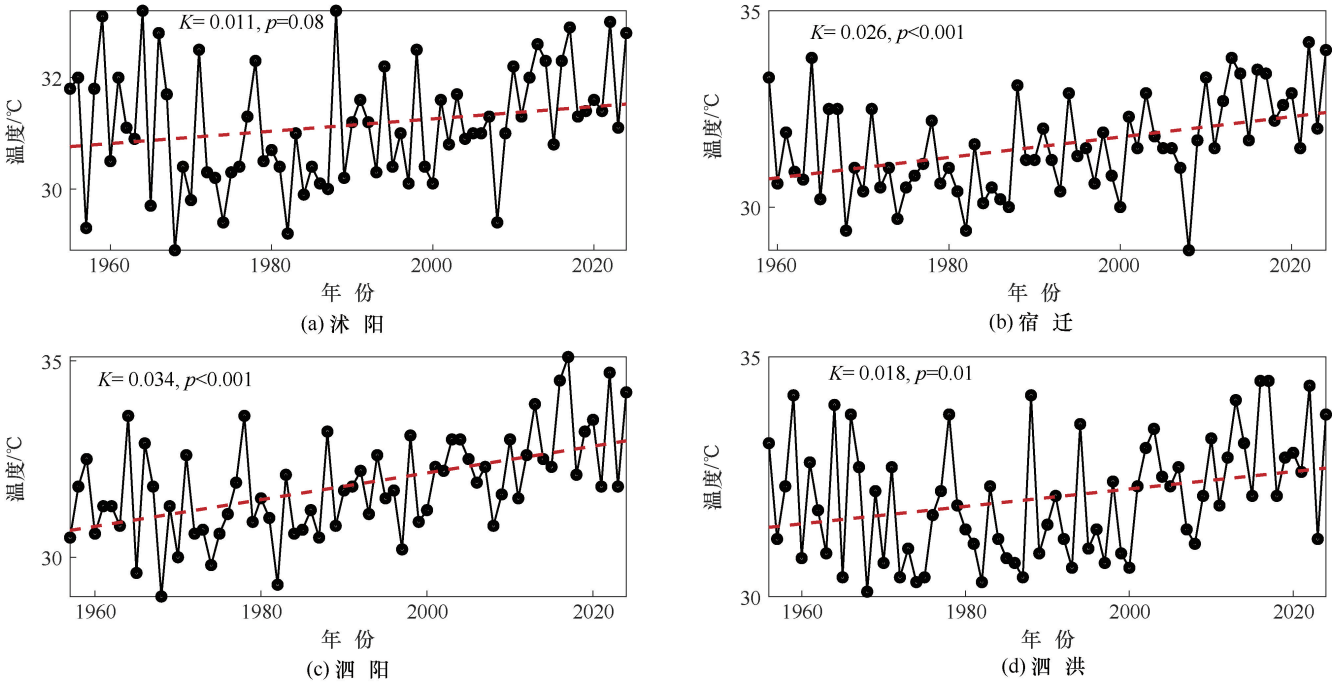


图 5　年最高温度 TX 变化

Fig. 5　Variations in annual maximum temperature (TX)

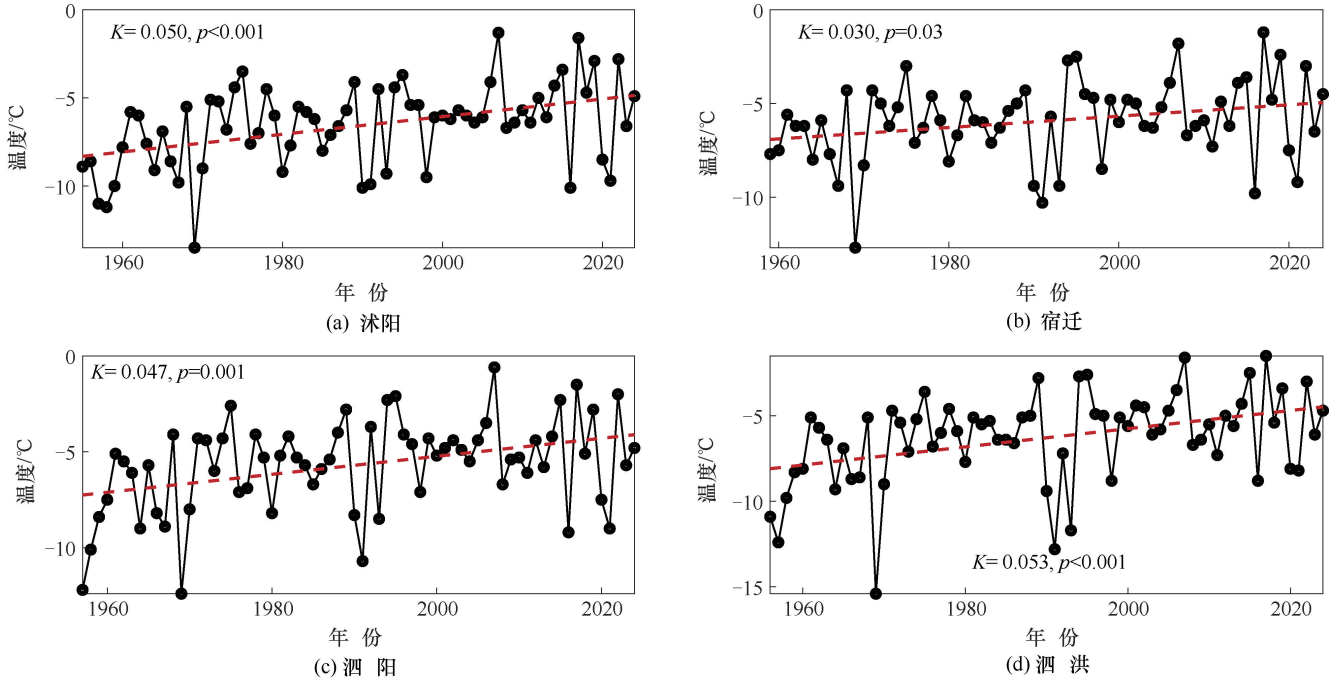


图 6　年最低温度 TN 变化

Fig. 6　Variations in annual minimum temperature (TN)

呈微弱上升，进一步佐证了极端低温事件的消退速度远快于高温事件的加剧。

2.4　复合极端气候事件变化

图 20 和图 21 为 4 类复合极端气候事件特征分布，区域复合极端事件类型高度集中于干类，湿类事件极少，且主导形态正由“冷干”向“暖干”发生阶段性更替。近 70 年来，各站干热与干冷事件发生次数为 220～255 次、229～239 次，年均发生天数分别约为 15～17 d 和 18 d；而暖湿与冷湿事件发生次数仅为 33～34、0～6 次，年均仅为 1.8 d 和不足 0.3 d。

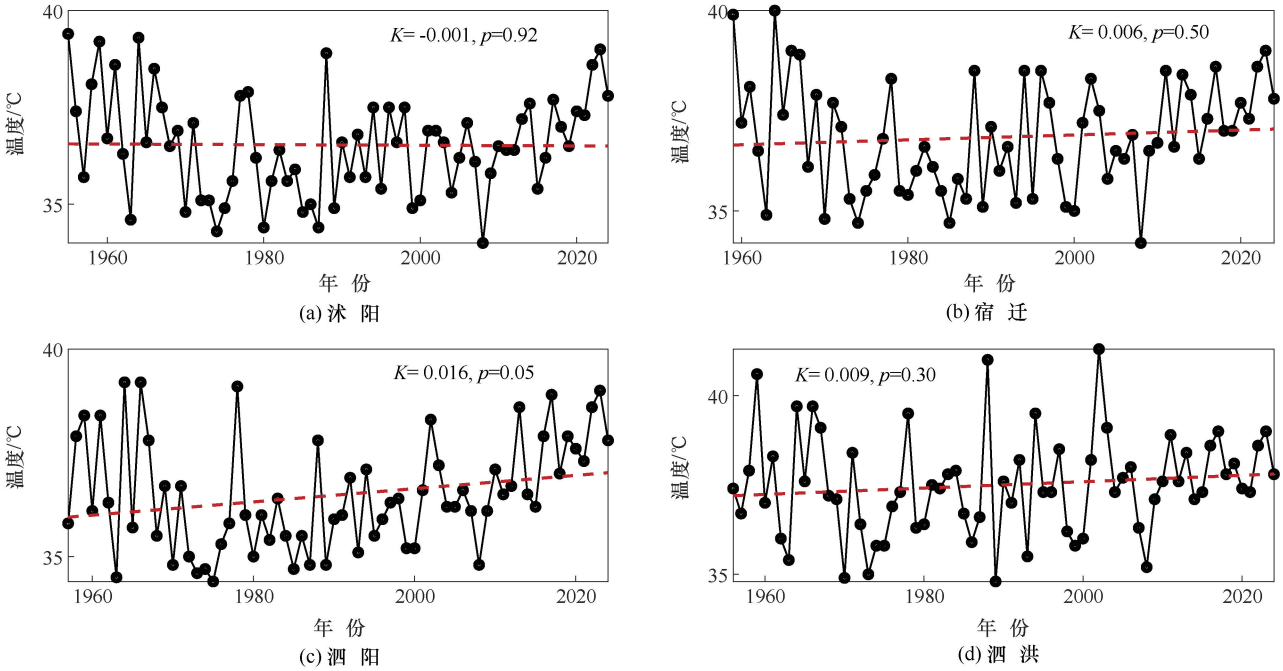


图 7　白天极端高温 TXx 变化

Fig. 7　Variations in daytime extreme high temperature (TXx)

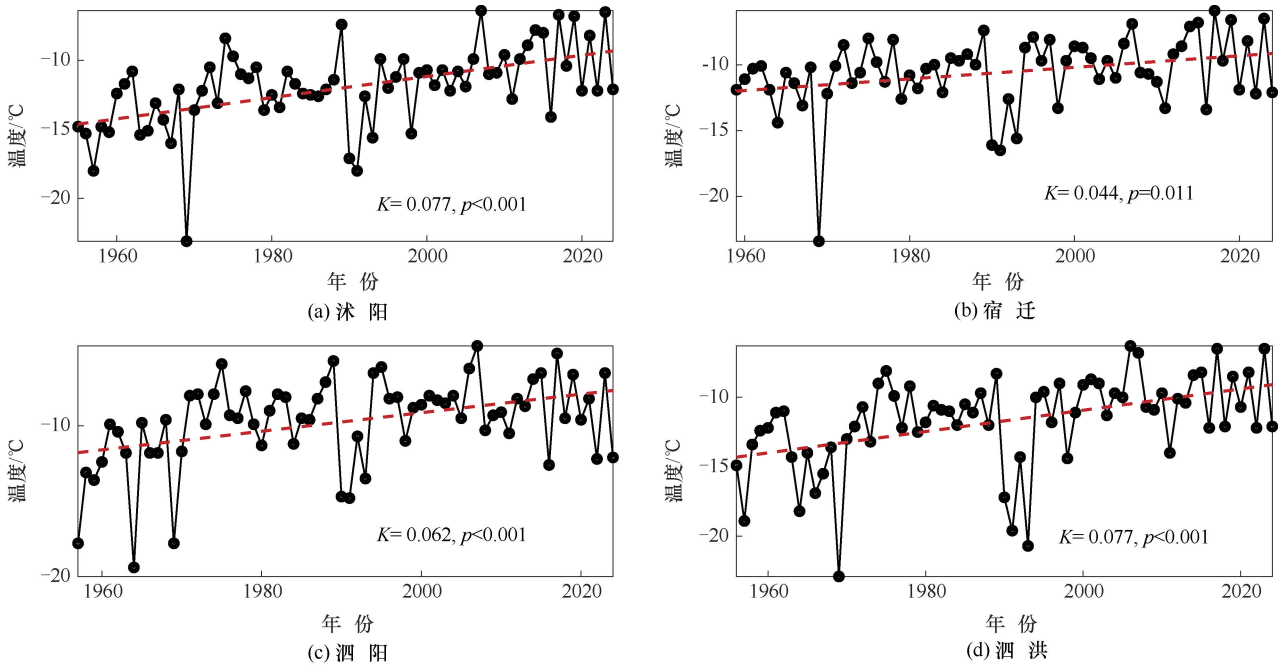


图 8　夜间极端低温 TNn 变化

Fig. 8　Variations in nighttime extreme low temperature (TNn)

在干类事件当中，干热和冷干事件频次和日数相仿，但总体以冷干为多。综合湿日和干日频次差异可知，当存在有效降雨时(>1 mm)，其气温遭遇极端高温或极端低温的概率较小。

图 22 和图 23 展示了干热和干冷事件年际变化。干冷事件显著减少(减幅高达 3.5～4.7 d/10 a，$p<0.001$)，干热事件仅缓慢增加(0.1～0.9 d/10 a)。对比干热和干冷事件变幅差异，一方面各站降水变化总体稳定；另一方面温度要素以升高趋势为主导，且冷昼日数 TX10p 减少而暖夜日数 TN90p 增多，导致干冷天数减幅明显高于干热天数的增幅。这一非对称变化导致区域气候风险的主导类型正在脱离冷干而转

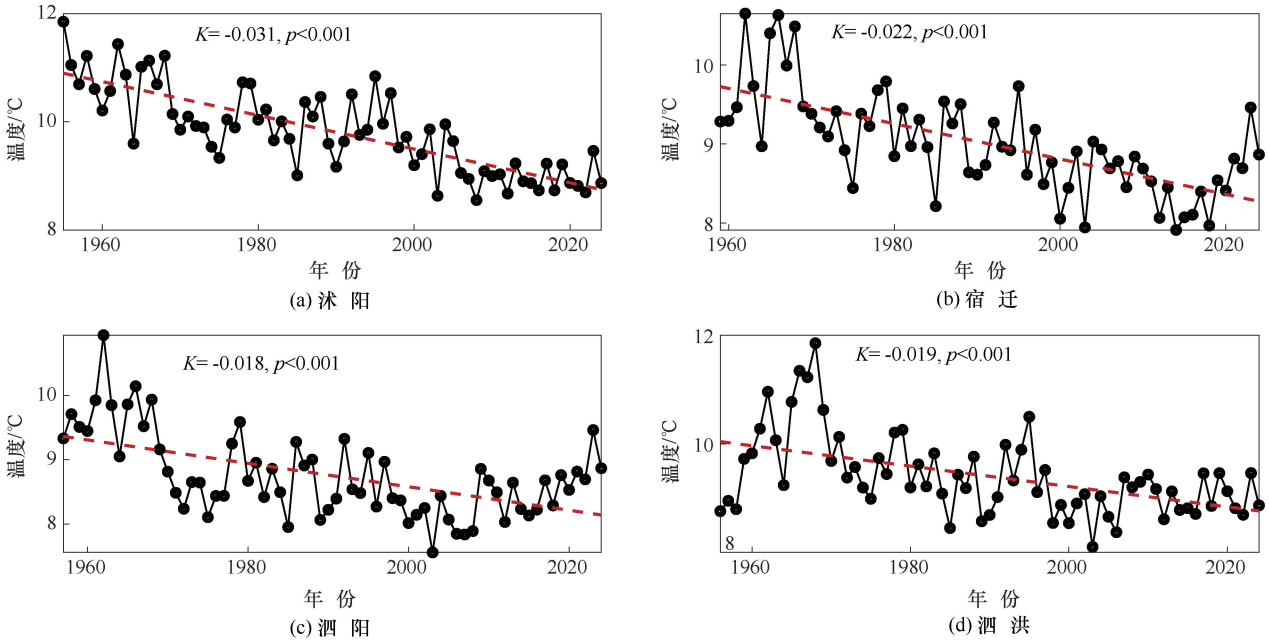


图 9　年均日较差 DTR 变化

Fig. 9　Variations in annual average diurnal temperature range (DTR)

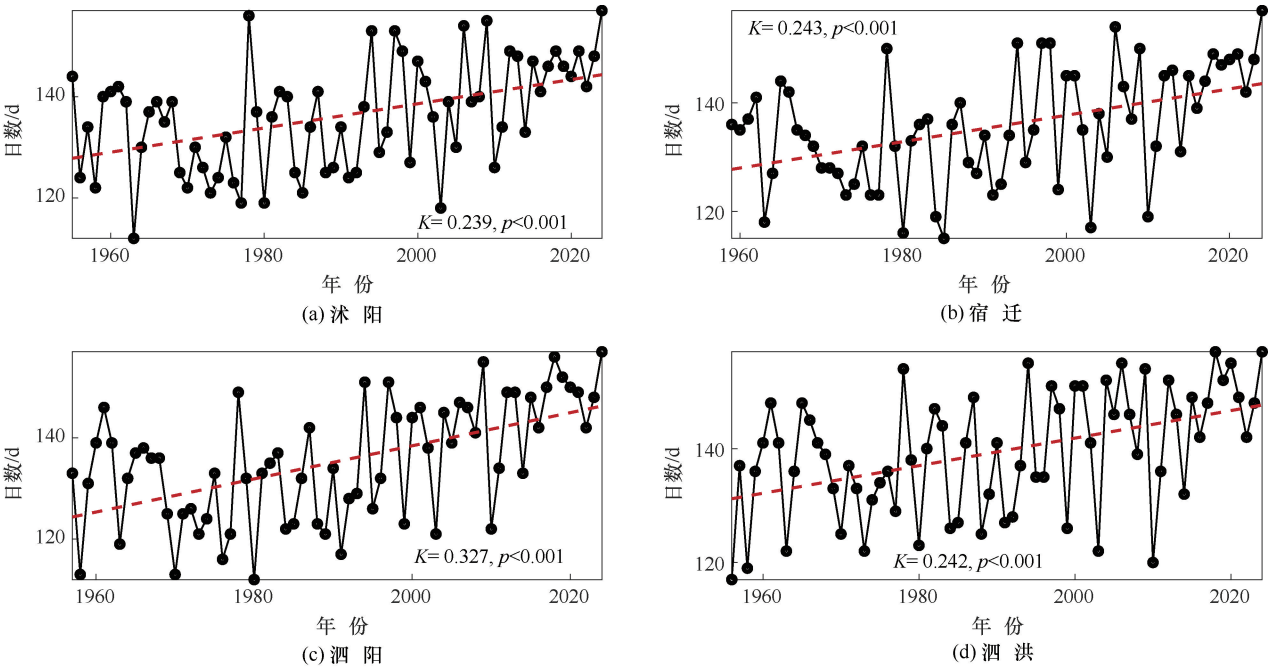


图 10　夏日指数 SU 变化

Fig. 10　Variations in summer days index (SU)

向暖干方向。

2.5　区域气候升温影响因素

前文结果表明，各类极端气候指标中气温升高趋势显著，低温类指标升高幅度明显高于高温类指标。这种不对称增温特征，导致冷事件大幅减少，其原因可能与以下因素相关：全球升温背景、大尺度气候系统强迫、局地下垫面调整与人类活动等多尺度因子的共同驱动。图 24 分别展示了全球长期变暖背景 GMST、局地城市热岛强度 UHI、城镇化率 UR 三类核心驱动因子的演变特征，三类因子均为上升趋势，且 MK、TFPW 趋势检验均达到极显著水平（$p < 0.001$），表明全球变暖与人为因素叠加，共同造成区域增温特征。

以城区气温为因变量，选取全球变暖 GMST、城

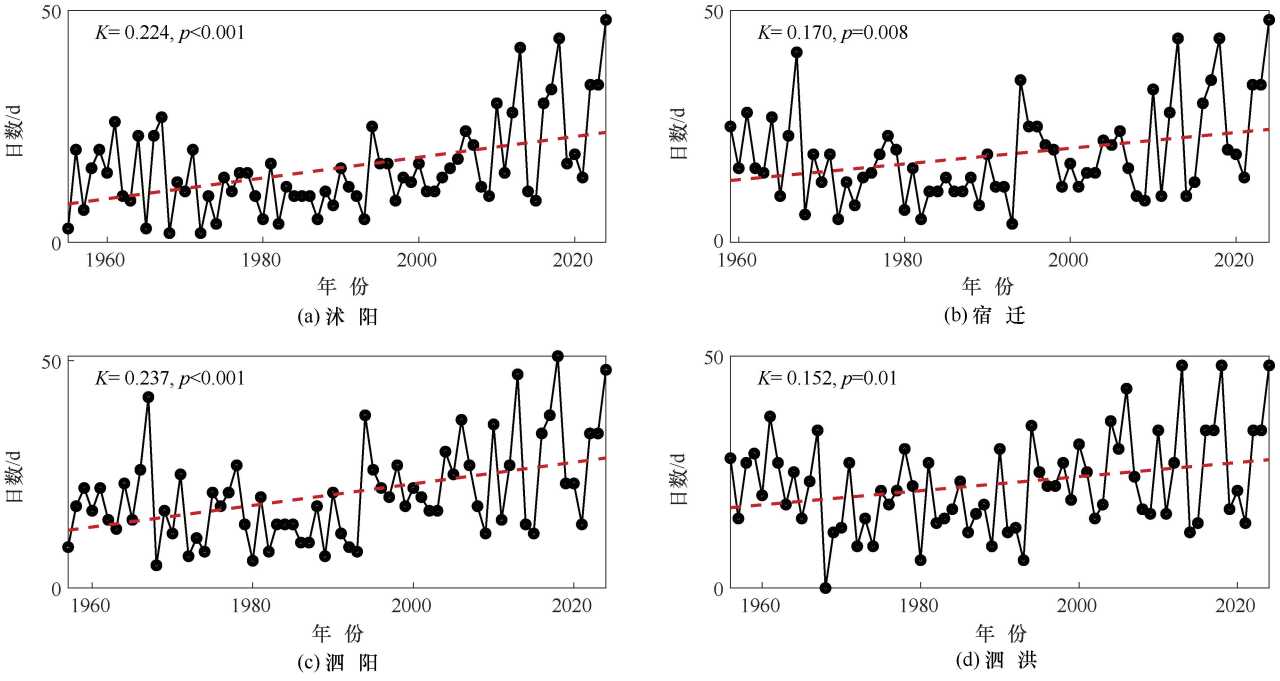


图 11　炎热指数 TR 变化

Fig. 11　Variations in tropical nights index (TR)

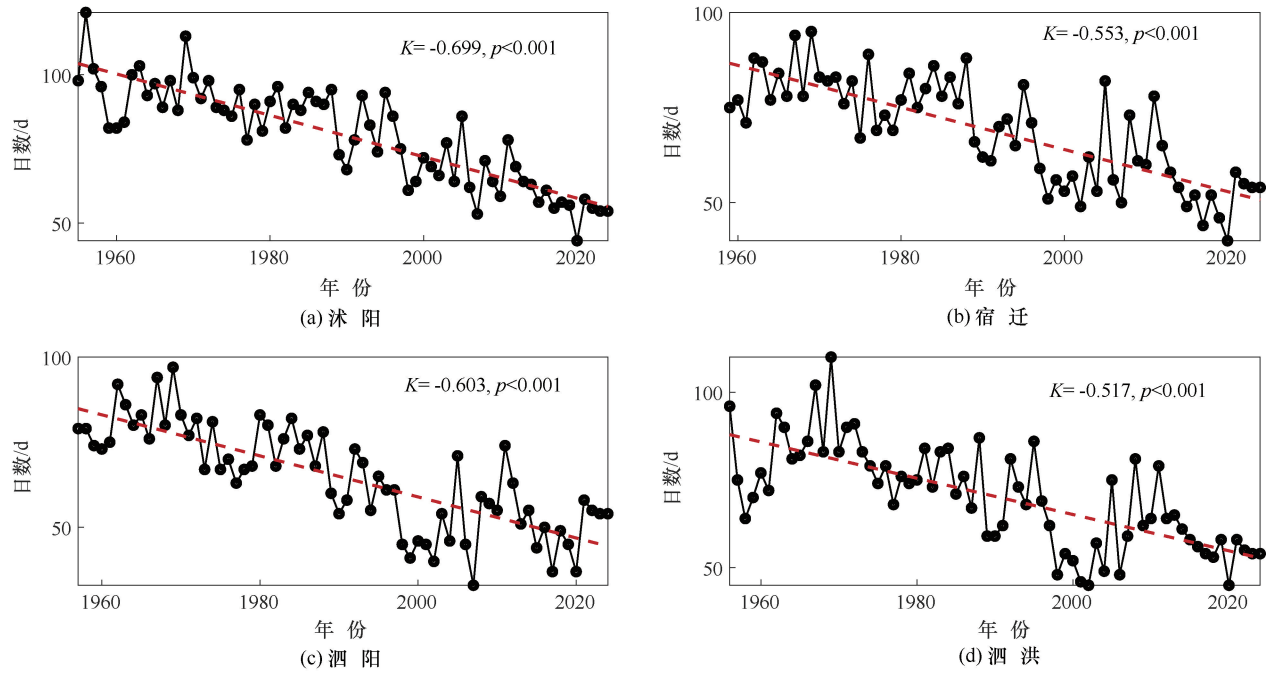


图 12　霜冻指数 FD 变化

Fig. 12　Variations in frost days index (FD)

镇化率 UR 以及 PDO、ONI、EASMI、EAWMI、NAO、WP 共 6 个大气环流因子，采用偏相关、逐步回归方法筛选出主要驱动因子，结果如表 6 所列。PDO、ONI、EASMI、EAWMI 偏相关 p 值均大于 0.05，对城区气温无显著独立作用；NAO、WP、GMST 偏相关系数显著为正，独立升温效应明显。城镇化率 UR 偏相关系数为负且 $p=0.12$，未达到 0.05 显著性水平。经检验，GMST 与 UR 的 Pearson 相关系数为 0.92，表明二者存在线性相关，GMST 回归系数最大(2.59)表明长期升温趋势主要由全球变暖背景主导，GMST 吸收了绝大部分升温方差，导致城镇化单独剩余作用被削弱并呈现微弱负值。计算 UR、

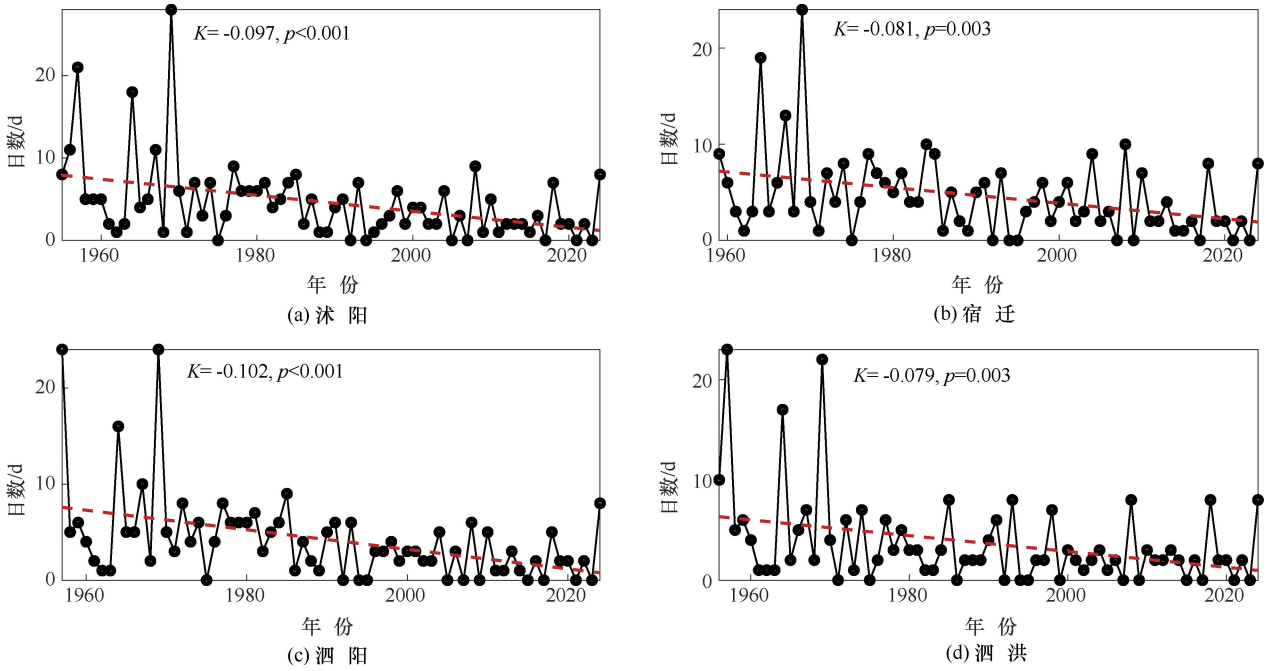


图 13　冰冻日数 ID 变化

Fig. 13　Variations in ice days index (ID)

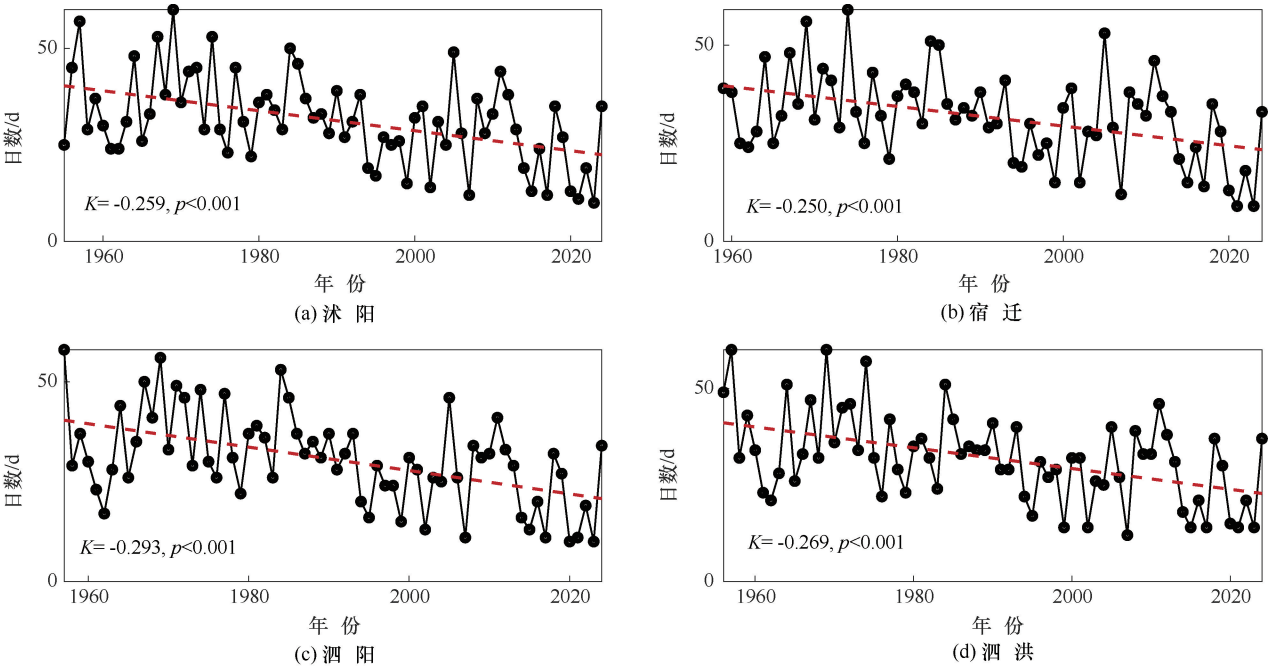


图 14　冷昼日数 TX10p 变化

Fig. 14　Variations in cool days (TX10p)

GMST 的方差膨胀因子 *VIF* 为 6.4，均小于临界值 10，表明存在一定程度的多重共线性但未达到明显干扰水平，所选因子可用于建模。

基于筛选出的 NAO、WP、UR、GMST 因子，首先构建仅包含 NAO、WP、GMST 的自然基准回归模型，模型拟合优度 $R^2 = 0.58$，表明大尺度环流与全球变暖共同可解释 58% 的城区气温变异，仍有 42% 气温波动无法由自然气候信号解释，预示城镇化等人为强迫具备不可忽略的驱动效应。在此基础上，以气温突变节点为分界开展分段多元线性回归，将序列划分为城镇化低速扩张(1992 年前)、高速扩张(1993 年后)两个阶段，对比不同发展阶段驱动机制差异。

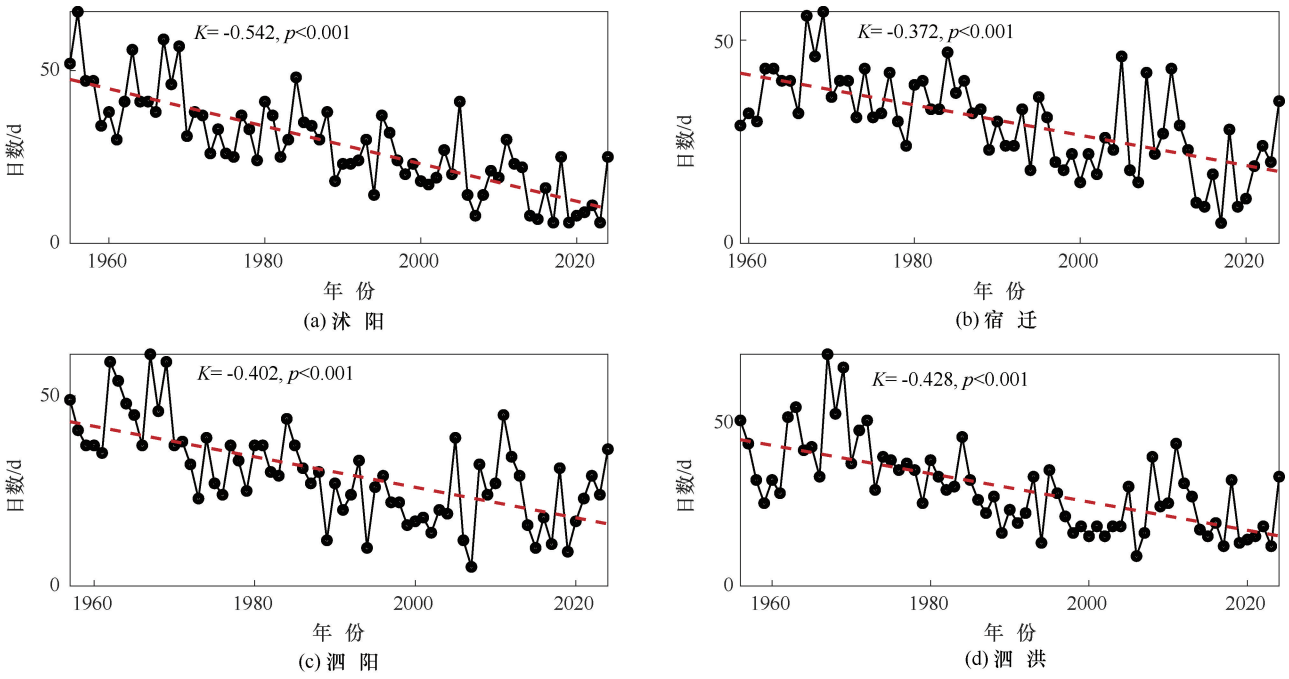


图 15　冷夜日数 TN10p 变化

Fig. 15　Variations in cool nights (TN10p)

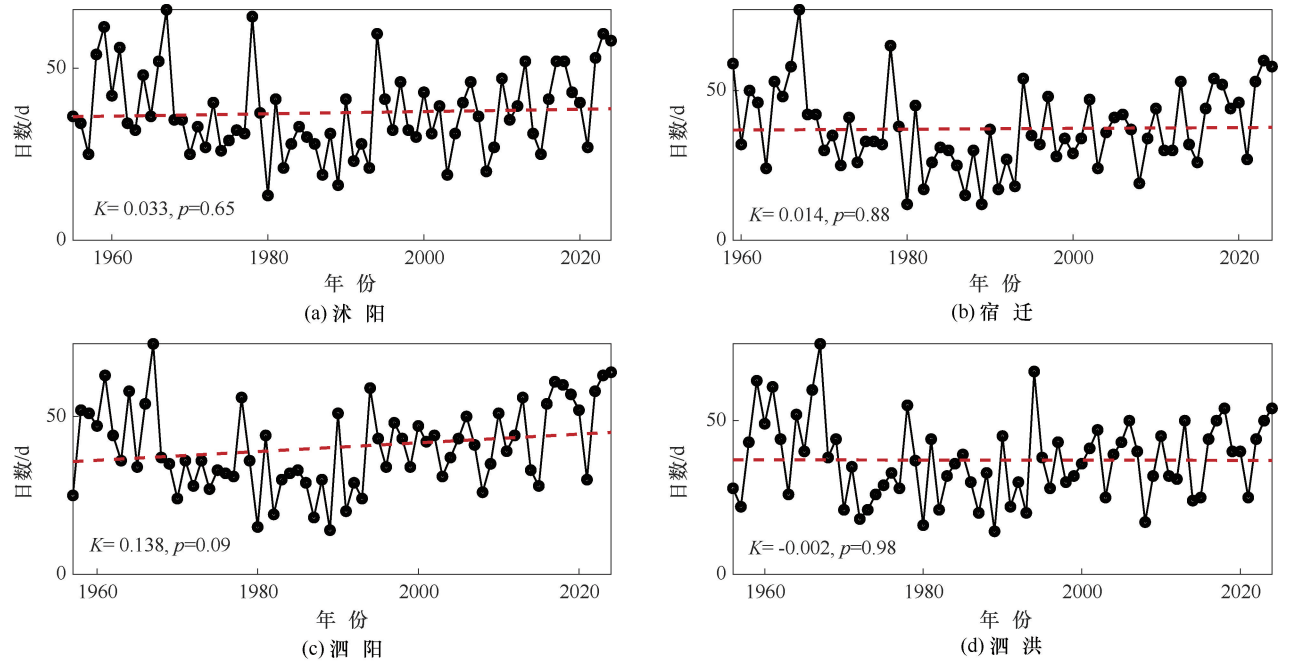


图 16　暖昼日数 TX90p 变化

Fig. 16　Variations in warm days (TX90p)

低速城镇化阶段模型 $R^2=0.70$（$p=0.003$），模型整体显著；高速城镇化阶段模型 $R^2=0.57$（$p=9\times10^{-5}$），但模型整体显著性大幅提升。结合两段回归系数与 95% 置信区间判断：NAO 在两段均显著正向升温，但高速城镇化阶段作用强度明显减弱；WP 在两时期序列下均无显著驱动效应，其原因是序列被分为两段后样本量缩减，导致统计显著性降低；GMST 为两段共同核心升温因子，低速阶段气温对全球变暖敏感度更高；城镇化率 UR 无稳定显著独立作用，仅存在微弱负向系数。分段回归结果表明，城镇化高速扩张会削弱大尺度环流调控能力，同时降低区域气温对全球变暖的响应幅度，城镇化自身未形成统计可靠的线性

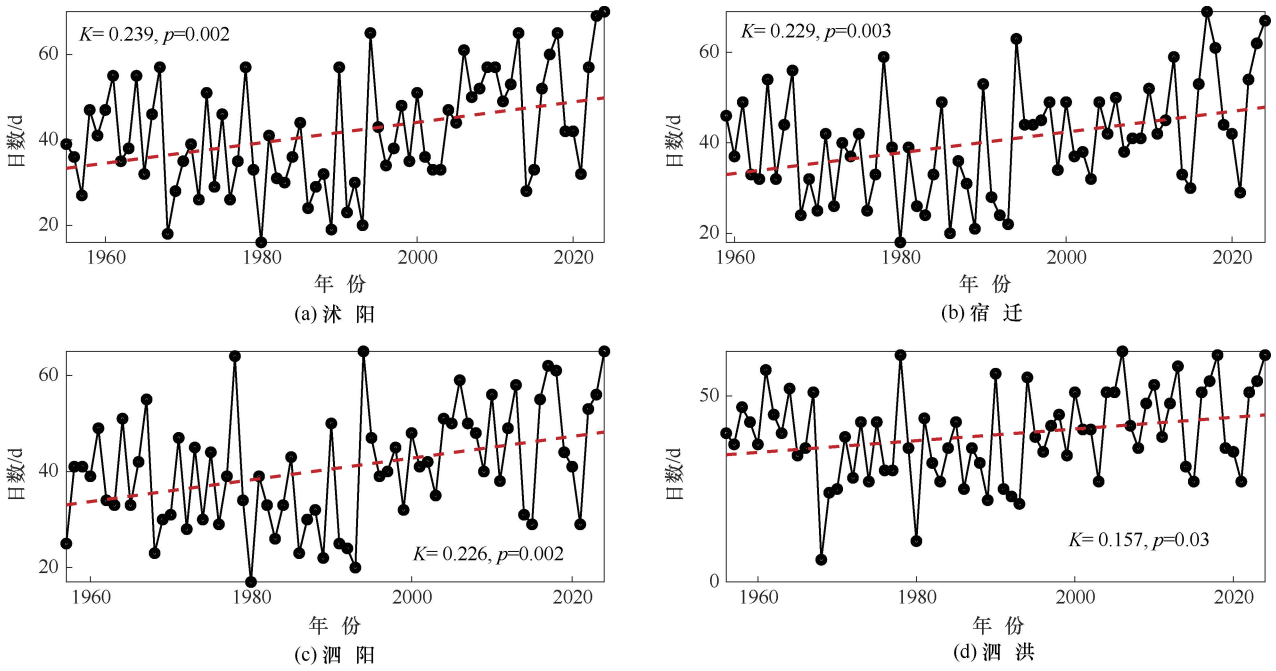


图 17　暖夜日数 TN90p 变化

Fig. 17　Variations in warm nights (TN90p)

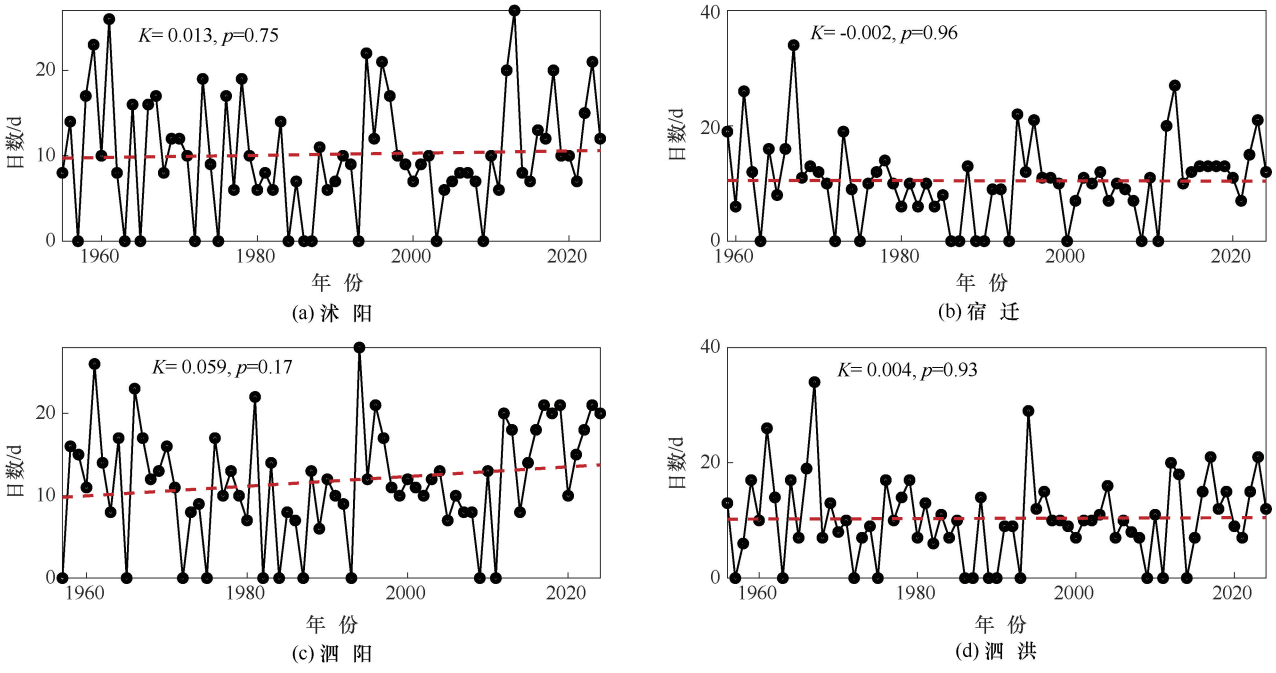


图 18　最大热日持续日数 *WSDI* 变化

Fig. 18　Variations in *WSDI* (maximum warm spell duration index)

升温信号。

为定量剥离多因子时序同步趋势带来的贡献混淆，采用分层分组回归法开展气温方差分解，将驱动因子划分为大气环流、全球变暖、城镇化三组，通过逐层拆分五类方差组分，分解结果如表 7 所列。从对气温总方差的绝对解释占比来看：全球变暖独立解释 23.2%，为贡献最高的单一驱动；多因子耦合交互作用解释 13.4%，该部分为变量同步变化形成的共享趋势，无法划分至任意单一因子；局地城镇化独立解释 8.8%；大尺度环流独立解释仅 3.1%；仍有 38.3% 的气温变异属于未解释残差，来源于随机气候波动与未纳入模型的局地中小尺度

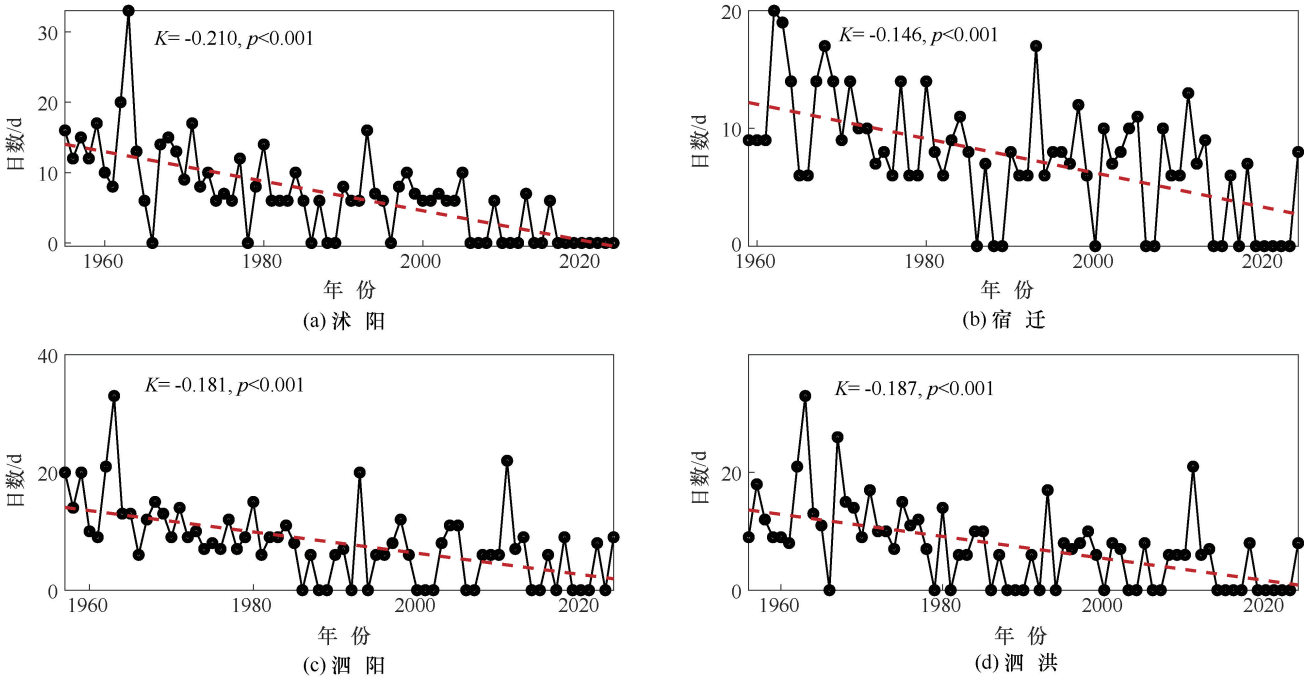


图 19　最大冷日持续日数 *CSDI* 变化

Fig. 19　Variations in *CSDI* (maximum cold spell duration index)

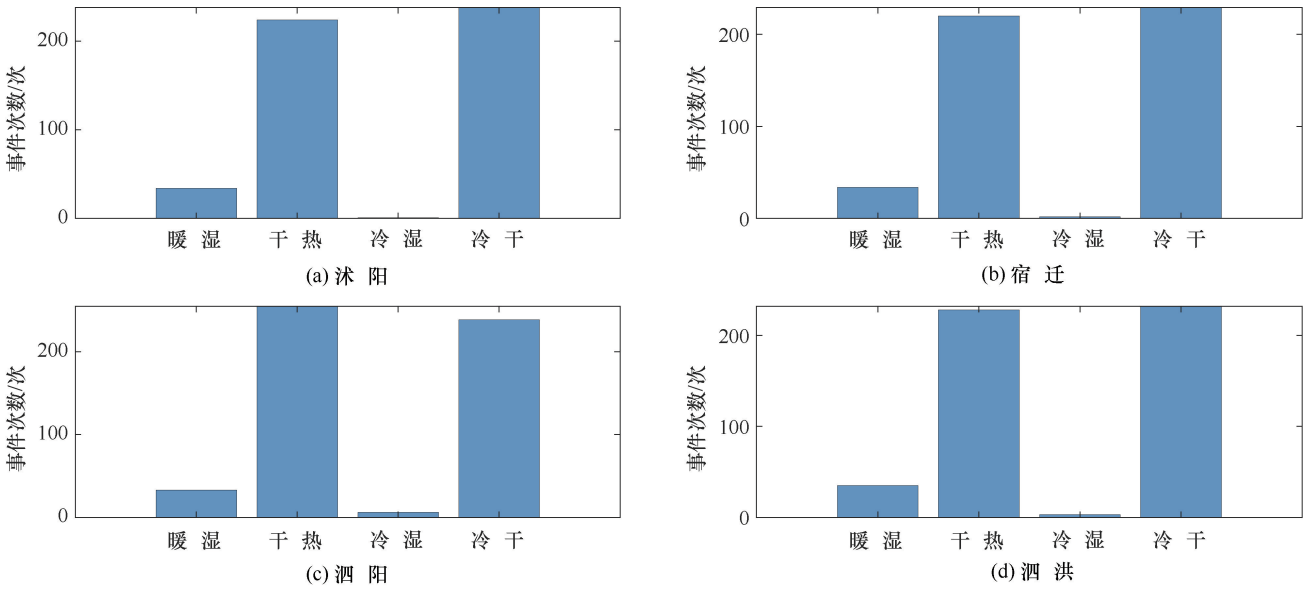


图 20　四类复合极端事件年均发生次数

Fig. 20　Annual average occurrence frequency of four types of compound extreme events

等非线性过程。

综合分段回归与方差分解结果可知，宿迁城区气温长期演变由全球变暖自然背景主导，大尺度环流仅调控气温年际小幅波动。城镇化人为强迫的长期累积波动可解释 8.8%的气温总变异，三类独立驱动内部相对占比达 35.1%，但逐年单位扩张带来的边际增温强度微弱，在城镇化低速、高速两个发展阶段均未形成稳定可靠的线性驱动效应。城镇化高速扩张改造局地下垫面，削弱了 NAO 环流对本地气温的调控强度，同时降低了区域气温对全球变暖背景的响应敏感度。

归因机制上，大尺度气候背景方面，全球温室气体浓度上升的辐射强迫对夜间低温抬升效应更显著[54]，叠加 1980 年代末东亚冬季风年代际减弱[55]，共同导致冷空气活动频次与强度下降，与淮河流域及我国东部低温变化规律高度一致[56]。局地

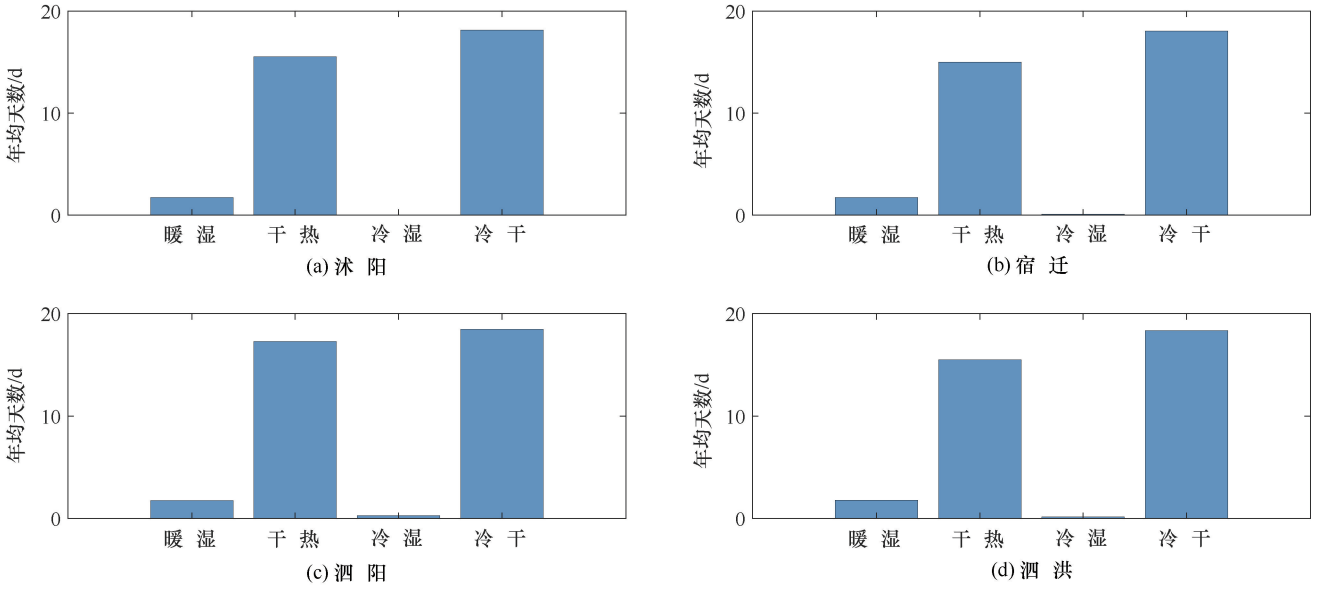


图 21　四类复合极端事件年均发生天数

Fig. 21　Annual average duration of four types of compound extreme events

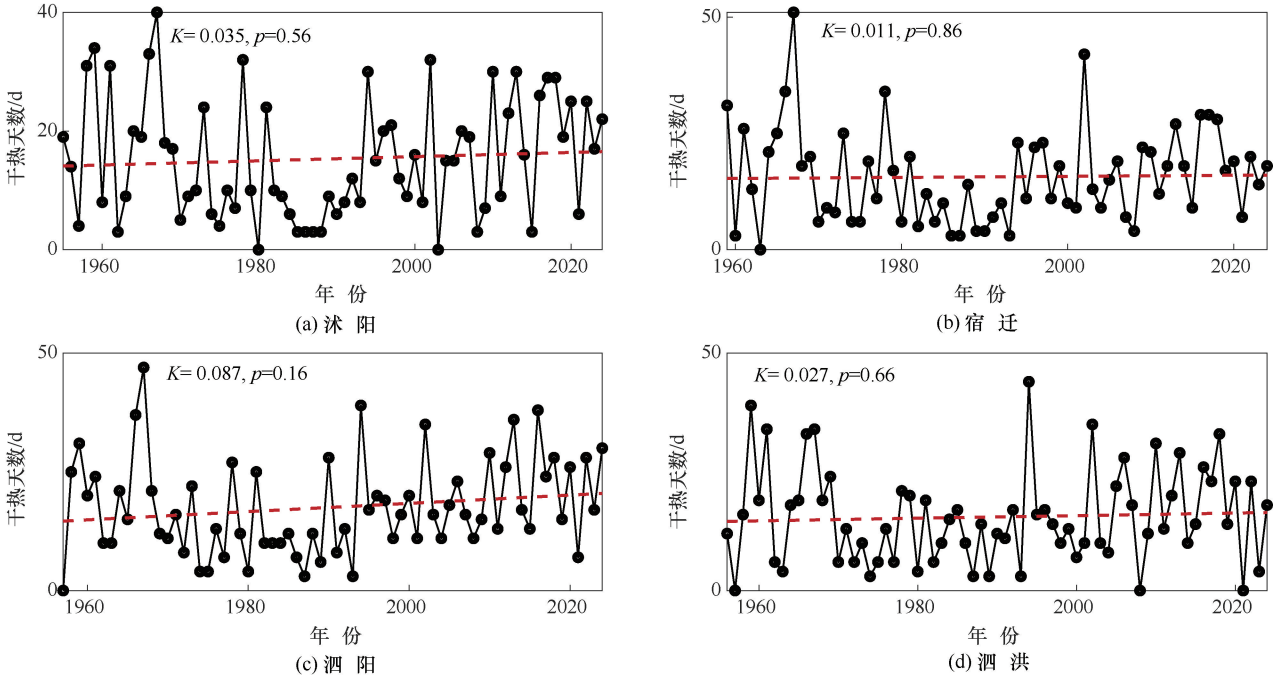


图 22　复合极端干热事件天数变化

Fig. 22　Variations in compound dry-warm event days

方面，宿迁河湖水系密集，气候变暖背景下“水汽增加—云量增多—大气逆辐射增强”的正反馈循环[57-58]及湖泊夜间调温效应，进一步放大了低温增温幅度；城市化下垫面转变则通过城市热岛夜间储热释放机制[59-60]，加剧了最低气温的上升趋势。三重因子共同推动了宿迁低温的快速升高及冷事件的整体减少。

3　讨　论

3.1　气候变化特征可靠性分析

为保障长序列气候分析结果可靠，本文采用了 MK、TFPW 方法开展趋势检验对比，两种方法对年降水“无显著趋势”、年均气温“极显著上升”的检验结果完全一致(见表 2)，趋势识别结果可信度较高。Pettitt 突变检验用于识别序列均值突变，信息熵

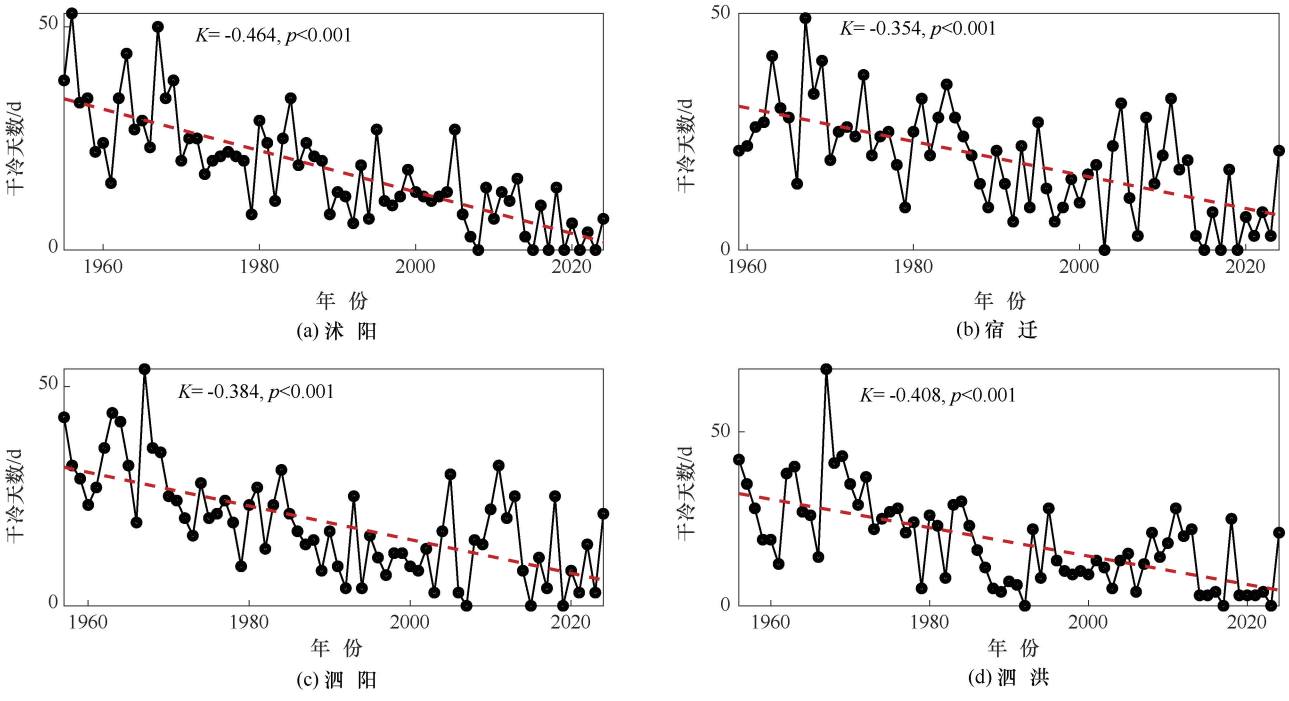


图 23　复合极端干冷事件天数变化

Fig. 23　Variations in compound dry-cold event days

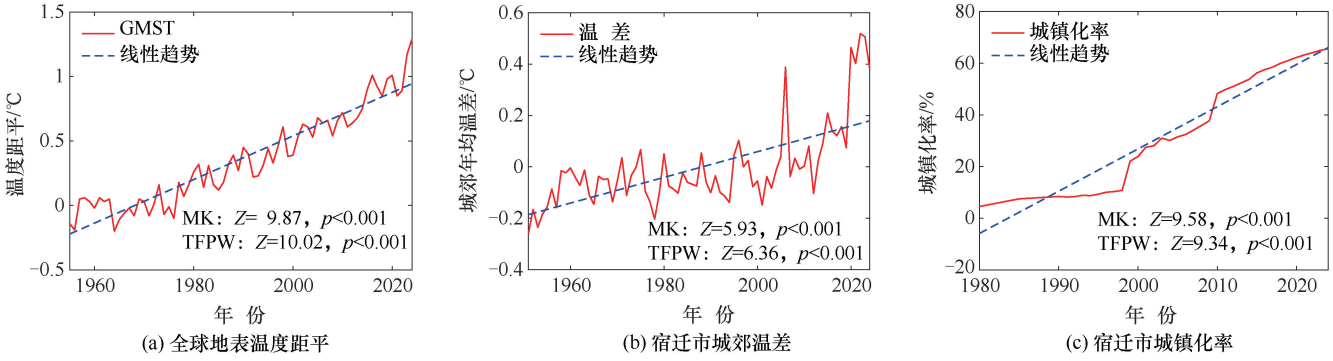


图 24　全球变暖、城市热岛与城镇化率时序演变特征

Fig. 24　Temporal variations in global warming, urban heat island intensity, and urbanization rate

表 6　多因子偏相关与逐步回归结果

Table 6　Partial correlation and stepwise regression results of multiple driving factors

因　子	偏相关		逐步回归		
	相关系数	p 值	回归系数	t 统计值	p 值
PDO	0. 14	0. 41	—	—	—
ONI	0. 21	0. 59	—	—	—
EASMI	0. 13	0. 47	—	—	—
EAWMI	−0. 02	0. 91	—	—	—
NAO	0. 55	9×10^{-5}	0. 67	4. 1	2×10^{-4}
WP	0. 33	0. 03	0. 37	2. 0	0. 04
UR	−0. 23	0. 12	−0. 02	−2. 0	0. 05
GMST	0. 52	2×10^{-4}	2. 59	4. 3	1×10^{-4}

表 7　升温方差来源分解

Table 7　Decomposition of variance sources of warming temperature

方差来源	大尺度环流	全球变暖	局地城镇化	多因子耦合	残　差
解释占比/%	3.1	23.2	8.8	13.4	38.3

IE 侧重表征序列波动特征突变，二者检验目标不同，因此结果存在合理差异；受篇幅限制，本文聚焦均值突变分析。

由于本研究对大量极端气候指标开展显著性检验，存在多重检验偏误风险，因此采用 Bonferroni 法[61]对检验水准进行校正。本次共检验 25 项降水类指标，校正后显著性临界值为 0.002；气温类指标共 15 项，校正后临界值为 0.003。校正后，绝大多数降水指标仍未达到显著水平(见表 3—表 5)，仅泗洪站部分暴雨、短时极端降水指标满足显著性要求；气温类指标原始 p 值普遍小于 0.001(见图 5—图 19)，校正后显著结论保持不变。综合来看，本研究趋势、突变检验结果稳健。从序列形态来看，各气候指标整体呈近似线性单调变化，无明显非线性转折，MK、TFPW、Pettitt 等线性框架下的检验方法适用性良好。

3.2　区域气候转型特征及其潜在影响

综合前述各维度指标，近 70 年来宿迁地区极端气候已发生格局转型，核心特征包括：昼夜不对称增温，夜间及低温升幅高于白天，冷事件减弱幅度大于暖事件增强幅度；降水总量平稳但结构改变，中雨减少，暴雨与短历时极端降水增加，连续无雨日与连续降水日同步缩短；复合极端事件由冷干主导向暖干主导转变。三类特征协同演变，标志区域气候格局已发生阶段性变化。

宿迁地处南北气候过渡带、河湖水网密集，且为典型稻麦轮作农业区，气候格局转变将产生多重现实影响。水安全方面，降水结构的极端化与夜间化，叠加宿迁地势低平、河网密布的下垫面特征，将显著增加城市内涝与中小河流突发洪水的风险[62]；连续干湿日数同步缩短，预示“旱涝急转”概率提升，加大水资源调度难度。农业生产方面，昼夜不对称增温对农业影响深远：霜冻与冷夜减少有利于冬小麦越冬，但暖夜与炎热指数上升将加剧水稻高温热害，威胁产量稳定[63]；降水极端化则易引发作物苗期渍涝、生育期阶段性干旱，同时提升田间病虫害暴发风险，过渡带农业系统气候稳定性有所下降。人居环境方面，夜间显著增温、暖夜与炎热指数上升使得夏季夜间闷热体感加剧，提升热相关疾病发病风险[64]；极端降水与高温热浪的组合变化，也改变了区域大气扩散条件，间接影响城市人居环境质量。

此外，本文极端气候指标较多，多数降水指标变化趋势较弱而未全部图示。未来可重点针对降水结构演变、昼夜不对称增温两大典型特征开展机理与影响深化研究，进一步厘清其形成机制与影响。

4　结论与展望

本研究基于宿迁市沭阳、宿迁、泗阳、泗洪 4 个气象站 1955—2024 年逐日气温与降水序列，系统分析了多尺度极端降水、多维度极端气温、复合极端事件的年际变化特征及多因子驱动归因，主要结论如下。

(1)年降水总量整体平稳，无显著长期趋势与均值突变，但降水结构发生明显转型。空间上呈现“北降南升”分异特征：中雨事件全域减弱，大雨、暴雨自北向南逐步增强；短时极端降水、夜间暴雨占比持续上升。最大连续无雨日与连续降水日数同步下降，降水持续性减弱，年内降水分布趋于均匀化、短时化。

(2)区域气温呈极显著线性上升趋势，升温速率为 0.28～0.38 ℃/10a，并于 1993 年发生全域一致性均值突变。气候呈现昼夜不对称增温典型特征：夜间最低气温、极端低温增温速率远高于白天最高气温与极端高温，气温日较差显著下降。冷昼、冷夜、霜冻、冰冻等冷事件大幅减少，暖昼、暖夜、高温事件持续增多，冷事件衰减幅度显著高于暖事件增长幅度；寒潮持续时间明显缩短，热浪持续性变化相对平缓。

(3)复合极端气候事件以干热、干冷类型为主，暖湿、冷湿事件发生频次极低。近 70 年干冷事件显著减少，干热事件缓慢增加，区域复合气候风险逐步由冷干主导转向暖干主导。

(4)驱动归因结果表明，全球变暖是宿迁城区气温变化的主控因子，独立方差贡献达 23.2%；大尺度环流独立贡献 3.1%，局地城镇化独立贡献 8.8%，多因子耦合交互作用解释 13.4% 的气温变异。以 1993 年突变点划分时段后发现，城镇化高速发展阶段会削弱大尺度环流与全球变暖对局地气温的调控强度；城镇化虽存在长期累积气候效应，但未形成统计显著的线性升温作用。

本研究基于地面气象站数据系统揭示了宿迁地区极端气候的多维度变化特征，未来可引入再分析资料、环流驱动因子与数值模拟方法，定量区分东亚冬季风变化、城市化、湖泊效应对宿迁不对称增温的贡献；结合高分辨率地形、水系与城市管网数据，开展夜间暴雨的城市内涝风险区划，揭示河湖湿地与城市化对局地洪涝风险的影响；进一步耦合水文、农业、生态等模型，开展极端气候演变的风险区划，最终提出面向水资源安全、农业生产、城市防洪与生态保护的适应对策，为宿迁市气候韧性建设提供精准科学支撑。

参考文献(References)：

[1] 蔡子怡，游庆龙，吴芳营，等. 全球碳中和背景下中国气候与极端气候变化[J]. 科技导报，2024，42(19)：73-84.
CAI Z Y，YOU Q L，WU F Y，et al. China's climate and extreme climate changes under the global carbon neutrality scenario[J]. Science & Technology Review，2024，42(19)：73-84.

[2] WARREN R. Extreme climate outcomes could still occur with just 2 ℃ of global warming[J]. Nature，2026，651(8107)：888-890.

[3] 贾朝阳，郭亮，崔嵩，等. 松花江流域NPP时空演变及其对极端气候的响应机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2024，22(1)：131-147.
JIA Z Y，GUO L，CUI S，et al. Spatial-temporal evolution of NPP and its response to extreme climate in Songhua River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology，2024，22(1)：131-147.

[4] IPCC. Climate Change 2021：The physical science basis. Working group I contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge，UK：Cambridge University Press，2023.

[5] JIN H Y，ZHANG K，LIU M，et al. Spatiotemporal evolution and hyetograph changes of global extreme precipitation[J]. Journal of Hydrology，2026，672：135325.

[6] SAMARA A，SMERDON E J，SEAGER R，et al. 2021-23：Extreme years of global drought in the context of long-and short-term hydroclimate trends[J]. Journal of Climate，2026，39(9)：2075-2096.

[7] YU Y F，YOU Q L，ZUO Z Y，et al. Compound climate extremes in China：trends，causes，and projections[J]. Atmospheric Research，2023，286：106675.

[8] 王玉洁，韩振宇，宋连春，等. 中国气候风险评估与早期预警框架[J]. 大气科学学报，2026，49(1)：121-134.
WANG Y J，HAN Z Y，SONG L C，et al. Framework of climate risk assessment and early warning in China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences，，2026，49(1)：121-134.

[9] 王依然，崔童，邹旭恺，等. 1961—2023年中国气候舒适日数变化及其影响因子[J]. 生态学报，2026，46(2)：1006-1023.
WANG Y R，CUI T，ZOU X K，et al. Research on the changes of climate comfort days and influencing factors in China from 1961 to 2023[J]. Acta Ecologica Sinica，2026，46(2)：1006-1023.

[10] WANG Q，ZHAI P M，ZHANG Q. Regional patterns of climate change and extreme events in China since 1961[J]. Journal of Meteorological Research，2025，39(3)：688-697.

[11] 曹晴，郝振纯，傅晓洁，等. 1960—2017年中国极端气候要素时空变化分析[J]. 人民黄河，2020，42(2)：11-17.
CAO Q，HAO Z C，FU X J，et al. Analysis of spatial-temporal changes of extreme climatic elements in China from 1960 to 2017[J]. Yellow River，2020，42(2)：11-17.

[12] 贾文茜，任国玉，于秀晶，等. 中国东部季风区不同气候带城市热岛效应的差异[J]. 气候与环境研究，2021，26(5)：569-582.
JIA W Q，REN G Y，YU X J，et al. 2021. Difference of urban heat island effect among representative cities of different climatic zones over eastern China monsoon region[J]. Climatic and Environmental Research，26(5)：569-582.

[13] 舒章康，李文鑫，张建云，等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J]. 中国工程科学，2022，24(5)：116-125.
SHU Z K，LI W X，ZHANG J Y，et al. Historical changes and future trends of extreme precipitation and high temperature in China[J]. Strategic Study of CAE，2022，24(5)：116-125.

[14] NYIRABUHORO P，NDAYISHIMIYE J C，RUI N，et al. Biodiversity and water conservation challenges in urban blue-green infrastructure under climate extremes[J]. Water Science and Engineering，2026，19(1)：85-96.

[15] AMNUAYLOJAROEN T，PARASIN N，SAOKAEW S. Climate-related extreme weather and urban mental health：A traditional and Bayesian meta-analysis[J]. Earth，2026，7(1)：14.

[16] HUANG Q Q，YI C Z. How does the construction of climate adaptive cities enhance climate resilience[J]. Journal of Environmental Planning and Management，2026，69(1)：180-202.

[17] 魏宗财，林宇栋，文晓岚，等. 国内外极端气候下城市韧性研究进展：概念框架、测度和优化策略[J]. 规划师，2025，41(7)：10-17.
WEI Z C，LIN Y D，WEN X L，et al. Research progress on urban resilience under extreme climates at home and abroad：Conceptual framework，measurement and improvement strategies[J]. Planners，2025，41(7)：10-17.

[18] 肖薇薇，安彬，贾丹. 1955—2017年安康市极端气候事件时序变化特征[J]. 水土保持研究，2021，28(5)：212-221.
XIAO W W，AN B，JIA D. Temporal variation characteristics of extreme weather events in Ankang from 1955 to 2017[J]. Research of Soil and Water Conservation，2021，28(5)：212-221.

[19] 吴利华，成鹏，董李勤，等. 1951—2017年丽江极端气温和降水事件的变化特征[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版)，2022，14(3)：253-266.
WU L H，CHENG P，DONG L Q，et al. Variation characteristics of extreme temperature and precipitation events of Lijiang from 1951 to

2017[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2022, 14(3): 253-266.

[20] 毕可心，董增川，李大勇，等. 温州市不同海拔极端降水时空演变[J]. 河海大学学报(自然科学版)，2025，53(1)：31-40.
BI K X, DONG Z C, LI D Y, et al. Temporal and spatial evolution of extreme precipitation at different altitudes in Wenzhou City, China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 31-40.

[21] 陈成，孙颖娜，祝恺. 近65a大连市极端降水时空分布特征分析[J]. 黑龙江水利科技，2025，53(7)：146-152.
CHEN C, SUN Y N, ZHU K. Analysis of spatio-temporal distribution characteristics of extreme precipitation in Dalian City over 65 Years [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2025, 53(7): 146-152.

[22] 陈跃萍，武胜利，赵昕，等. 近60 a哈密市极端气温时空变化特征[J]. 干旱区地理，2023，46(6)：868-879.
CHEN Y P, WU S L, ZHAO X, et al. Spatial and temporal variation characteristics of extreme temperatures in Hami City in the past 60 years[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(6): 868-879.

[23] 鲁同所，王红宾，雷阳，等. 拉萨市近50年极端气温的时间特征分析[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版)，2021，46(1)：115-125.
LU T S, WANG H B, LEI Y, et al. Temporal characteristics of extreme temperature events during the recent 50 years in Lhasa[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 46(1): 115-125.

[24] 周玉良，周磊，周平，等. 秦岭-淮河地区降水空间聚类分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2024，22(6)：1100-1109.
ZHOU Y L, ZHOU L, ZHOU P, et al. Spatial clustering of the Qinling-Huaihe region based on precipitation indexes[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1100-1109.

[25] 秦正，赵景峰，程武学，等. 气候变化背景下秦岭-淮河地区亚热带北界变化[J]. 气候变化研究进展，2023，19(1)：38-48.
QIN Z, ZHAO J F, CHENG W X, et al. Change of subtropical northern boundary in Qinling-Huaihe region in the context of climate change [J]. Climate Change Research, 2023, 19 (1): 38-48.

[26] 张雯叶，杨星，侯苗，等. 宿迁市农业灌溉用水合理性及其影响因素研究[J]. 江苏水利，2026(4)：44-49.
ZHANG W Y, YANG X, HOU M, et al. Analysis of the rationality of agricultural irrigation water use and its influencing factors in Suqian City[J]. Jiangsu Water Resources, 2026(4): 44-49.

[27] 侯煞晨，谢世友. 中小城市水资源生态足迹与生态承载力时空分析：以宿迁市为例[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2020，42(12)：134-141.
HOU X C, XIE S Y. A spatial and temporal analysis of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in small and medium-sized cities: a case study of Suqian city[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2020, 42(12): 134-141.

[28] 颜雅琼，岳元，唐舟，等. 气候变化背景下淮河流域干旱演变特征[J]. 水土保持研究，2023，30(3)：336-344.
YAN Y Q, YUE Y, TANG Z, et al. Characteristics of drought evolution in the Huaihe River Basin under the background of climate change[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 336-344.

[29] 刘远，李莹，王雅琦，等. 2025年中国主要气候风险及气象灾害概述[J]. 气象科学，2026，46(1)：1-10.
LIU Y, LI Y, WANG Y Q, et al. Overview of the China climate risk and major meteorological disaster in 2025 [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2026, 46(1): 1-10.

[30] 张庆奎，戴秋丹，吴凌云，等. 近45年江淮地区不同等级降水气候特征及变化趋势分析[J]. 气候与环境研究，2025，30(5)：549-562.
ZHANG Q K, DAI Q D, WU L Y, et al. Climatic characteristics and variation trends of precipitation for different grades in Jianghuai region in recent 45 years [J]. Climatic and Environmental Research, 2025, 30(5): 549-562.

[31] 乔世荣，徐霞，黄奕钦. 中国内陆沿海地区1986—2015年极端气候指数对生态系统脆弱性的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版)，2024，60(3)：438-446.
QIAO S R, XU X, HUANG Y Q. Impact of extreme climate change on ecosystem vulnerability in the Chinese coastal areas[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2024, 60(3): 438-446.

[32] 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(3)：536-547.
YANG Y, ZHAO N, YUE T X. Spatio-temporal variations of extreme high temperature event in China from 1980 to 2018[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(3): 536-547.

[33] 孙忠保. 近60年淮河流域极端降水和极端温度时空变化特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版)，2024，42(3)：35-45.
SUN Z B. Spatio-temporal variations of extreme precipitation and extreme temperature over the Huaihe River Basin during the past 60 years[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2024, 42(3): 35-45.

[34] 雷诺，周正正，路平，等. 变化环境下长三角地区极端降水非平稳性及其时空分异特征[J]. 水科学进展，2025，36(3)：436-449.
LEI N, ZHOU Z Z, LU P, et al. Spatial distribution patterns of non-stationary extreme precipitation under changing environment in the Yangtze River Delta region[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(3): 436-449.

[35] 周毓豪. 基于EOF的江苏省多年降雨和气温时空分布特征[J]. 水利规划与设计，2024(3)：50-54.
ZHOU Y H. Spatiotemporal distribution characteristics of multi-year precipitation and temperature in Jiangsu Province based on EOF[J]. Water Resources Planning and Design, 2024(3): 50-54.

[36] 张梦，王艺橙，王蓓元. 全球变暖背景下江苏地区冬季极端温

度指数特征[J]. 农业灾害研究，2024，14(1)：185-187.
ZHANG M，WANG Y C，WANG B Y. Characteristics of winter extreme temperature indices in Jiangsu Province under the background of global warming[J]. Journal of Agricultural Disaster Research，2024，14(1)：185-187.

[37] 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.
LIU K，NIE G G，ZHANG S. Study on the spatiotemporal evolution of temperature and precipitation in China from 1951 to 2018[J]. Advances in Earth Science，2020，35(11)：1113-1126.

[38] 贾易周，雷昕懋，邓琪，等. 近 60 年中国省级行政单元极端气候指数的时空变化特征[J]. 人民珠江，2026，47(4)：94-106.
JIA Y Z，LEI X M，DENG Q，et al. Characteristics of extreme climate index changes in provincial-level administrative units in China over past 60 years[J]. Pearl River，2026，47(4)：94-106.

[39] YANG S，WANG X，GUO J，et al. Trend analysis of extreme precipitation and its compound events with extreme temperature across China[J]. Water，2025，17(18)：2713.

[40] 夏智宏，陈笑笑. 1961—2022 年长江流域复合极端气候事件演变特征[J]. 长江科学院院报，2025，42(11)：1-8.
XIA Z H，CHEN X X. Evolution characteristics of compound extreme climate events in the Yangtze River Basin from 1961 to 2022[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute，2025，42(11)：1-8.

[41] 孙庆飞，周甘凝，王雨轩. 江苏近 50 年干湿季降水差异的时空变化及气候变暖下未来趋势分析[J]. 农业灾害研究，2024，14(2)：209-211.
SUN Q F，ZHOU G N，WANG Y X. Spatiotemporal variation of precipitation difference between dry and wet seasons in Jiangsu Province in recent 50 years and analysis of future trends under climate warming[J]. Journal of Agricultural Disaster Research，2024，14(2)：209-211.

[42] 彭卓越，梁煜彬，方红远，等. 南水北调东线江苏-山东段受水区的碳储量时空演变与驱动因子[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2024，22(6)：1080-1090.
PENG Z Y，LIANG Y B，FANG H Y，et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon stock in water-receiving area of Jiangsu-Shandong section of Eastern Route of South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology，2024，22(6)：1080-1090.

[43] QIN M S，ZHANG L T，WAN S Q，et al. Spatiotemporal climate variation and analysis of dry-wet trends for 1960—2019 in Jiangsu Province，southeastern China[J]. Advances in Meteorology，2022(1)：9183882.

[44] NIU Z，LIU Y，FENG L，et al. Spatio-temporal distribution characteristics of different types of compound extreme climate events in the Yangtze River Basin[J]. Natural Hazards，2025，121(8)：1-20.

[45] 许生，万吉祥，石磊，等. 宿迁境内洪泽湖周边及以上地区水利治理的思考与建议[J]. 治淮，2019(11)：49-50.
XU S，WAN J X，SHI L，et al. Thoughts and suggestions on water conservancy governance in the areas around and above Hongze Lake in Suqian[J]. Harnessing the Huaihe River，2019(11)：49-50.

[46] 李雷，李凯，蔡建. 洪泽湖地区 2018 年 8 月洪涝灾害成因分析及建议措施[J]. 治淮，2019(8)：9-10.
LI L，LI K，CAI J. Cause analysis and suggested measures for the flood disaster in Hongze Lake area in august 2018[J]. Harnessing the Huaihe River，2019(8)：9-10.

[47] 徐恩，周航，程昕，等. 宿迁市极端气候事件变化特征及其未来趋势预测[J]. 气候变化研究快报，2024，13(2)：380-390.
XU E，ZHOU H，CHENG X，et al. Variation characteristics and future trend prediction of extreme climate events in Suqian[J]. Climate Change Research Letters，2024，13(2)：380-390.

[48] 司鹏，郭军，赵煜飞，等. 北京 1841 年以来均一化最高和最低气温日值序列的构建[J]. 气象学报，2022，80(1)：136-152.
SI P，GUO J，ZHAO Y F，et al. New series of daily maximum and minimum temperature observations for Beijing，China since 1841[J]. Acta Meteorologica Sinica，2022，80(1)：136-152.

[49] 王灵子，姜仁贵，赵勇，等. 渭河干流洪水演变趋势与变异特征研究[J]. 水利水运工程学报，2024(6)：33-42.
WANG L Z，JIANG R G，ZHAO Y，et al. Research on the evolution trend and variation characteristics of flooding in the main stream of the Wei River[J]. Hydro-Science and Engineering，2024(6)：33-42.

[50] 那扎凯提·托乎提，虎胆·吐马尔白，焦萍，等. 和田河流域近 60 年降水、气温与径流演变特征研究[J]. 水文，2022，42(1)：85-89.
NAZAKAITI T，HUDAN T，JIAO P，et al. Study on the evolution characteristics of main hydrometeorological factors and runoff in Hetian River Basin in recent 60 years[J]. Journal of China Hydrology，2022，42(1)：85-89.

[51] 张金萍，张航. 黄河流域降水时空演变规律研究[J]. 中国农村水利水电，2022(3)：60-68.
ZHANG J P，ZHANG H. Spatio-temporal variation characteristics of precipitation in the Yellow River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower，2022(3)：60-68.

[52] 潘金金，任宗萍，胥世斌，等. 宁夏不同植被类型 NDVI 变化特征及其对气候的响应[J]. 地球科学与环境学报，2023，45(4)：819-832.
PAN J J，REN Z P，XU S B，et al. Variation characteristics of NDVI of different vegetation types in Ningxia，China and their responses to climate[J]. Journal of Earth Sciences and Environment，2023，45(4)：819-832.

[53] 郑芳，李芳然，甘义群，等. 极端气候事件对洞庭湖水文连通性变化的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2024，22(1)：67-79.
ZHENG F，LI F R，GAN Y Q，et al. The impact of extreme climatic events on hydrological connectivity of Dongting Lake[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology，2024，22(1)：67-79.

[54] 李楠，崔耀平，刘小燕，等. 中国碳收支对全球辐射强迫的影

响[J]. 地理学报，2024，79(11)：2880-2894.
LI L，CUI Y P，LIU X Y，et al. Contribution of China's carbon budget to global radiative forcing[J]. Acta Geographica Sinica，2024，79(11)：2880-2894.

[55] 韩永秋，周连童，黄荣辉. 中国冬半年极端低温事件的时空特征及其与东亚冬季风的关系[J]. 气候与环境研究，2021，26(1)：1-17.
HAN Y Q，ZHOU L T，HUANG R H. Characteristics of the extreme low temperature events in China during boreal winter and its relationship to east Asian winter monsoon [J]. Climatic and Environmental Research，2021，26(1)：1-17.

[56] SUN P，ZHANG Q，YAO R，et al. Spatiotemporal patterns of extreme temperature across the Huai River Basin，China，during 1961—2014，and regional responses to global changes [J]. Sustainability，2018，10(4)：1236.

[57] COX D T C，MACLEAN I M D，GARDNER A S，et al. Global variation in diurnal asymmetry in temperature，cloud cover，specific humidity and precipitation and its association with leaf area index[J]. Global Change Biology，2020，26(12)：7099-7111.

[58] CHU B W，LUO J F，WANG H K. Spatiotemporal trend of nighttime temperature anomaly and its atmospheric mechanism[J]. Science China Earth Sciences，2025，68(6)：1853-1862.

[59] 王雪娆. 气候变化和城市化背景下城市降雨和径流的变化研究[D]. 北京：北京建筑大学，2024.
WANG X R. Study on the Changes of Urban Rainfall and Runoff in the Context of Climate Change and Urbanization [D]. Beijing University of Civil Engineering and Architecture，2024.

[60] 李海俊. 长三角城市群下垫面非均匀性对夏季区域热岛效应影响的模拟研究[D]. 南京：南京信息工程大学，2019.
LI H J. Numerical Simulation of The Effect of Urban Underlying Surface Heterogeneity on Summer Regional Heat Island Effect in the Yangtze River Delta[D]. Nanjing：Nanjing University of Information Science & Technology，2019.

[61] 赵明哲，苗令占，罗丹，等. 干湿气候带对青藏高原河流温室气体排放的特异性调控[J/OL]. 中国环境科学，2026. [2026-06-15]. https：//doi. org/10. 19674/j. cnki. issn1000-6923. 2026 0526. 003.
ZHAO M Z，MIAO L Z，LUO D，et al. Arid-humid climate zones drive gas-specific greenhouse gas emissions from rivers on the Qinghai-Tibet Plateau[J/OL]. China Environmental Science，2026. [2026-06-15]. https：//doi. org/10. 19674/j. cnki. issn1000-69 23. 2026 0526. 003.

[62] 马昱斐，张建云，刘翠善，等. 我国城市极端暴雨洪涝新特征与韧性提升建议[J]. 中国工程科学，2026，28(2)：260-274.
MA Y F，ZHANG J Y，LIU C S，et al. New characteristics of extreme rainstorm and flood in Chinese cities and suggestions for enhancing resilience[J]. Strategic Study of CAE，2026，28(2)：260-274.

[63] 张晶，王姝心，吴兆飞，等. 极端气候事件对中国温带森林秋季物候的影响[J]. 地理学报，2025，80(7)：1786-1800.
ZHANG J，WANG S X，WU Z F，et al. Effects of extreme climate events on autumn phenology of temperate forests in China[J]. Acta Geographica Sinica，2025，80(7)：1786-1800.

[64] MATHEWS S，WALKER C，GAO K H，et al. Compound climate extreme events and associated health impacts：A scoping review[J]. BMC Medicine，2026，24(1)：275.

（责任编辑　王海锋）