

宿迁市极端气候事件变化特征及其未来趋势预测

徐恩, 周航, 程昕, 宋柳贤, 丁晓敏

宿迁市气象局, 江苏 宿迁

收稿日期: 2024年2月20日; 录用日期: 2024年3月21日; 发布日期: 2024年3月28日

摘要

文章基于宿迁市4个气象站点1961~2021年逐日降水量、平均气温、最高和最低气温数据, 运用线性趋势法、Mann-Kendall检验法、RCLimDex模型、小波分析和R/S分析法, 分析了18个极端气温和降水指数的变化特征, 并进行了趋势预测。结果表明: 1) 极端高温和极端低温均呈增加趋势, 气温日较差呈减小趋势; 极端高温(低温)事件的频率和持续性呈上升(下降)趋势; 2) 极端降水事件的强度和频率呈微弱的上升趋势, 持续性呈微弱的下降趋势; 3) 极端气温冷指数的升温趋势明显高于暖指数, 而夜指数的升温幅度也超过昼指数; 4) 从周期性来看, 极端气温指数存在2~6 a的周期变化; 极端降水指数存在2 a左右的周期变化; 5) R/S分析表明, 未来宿迁地区气候变暖的状态仍继续保持; 极端降水指数增减趋势不一致; 极端气温指数的平均循环长度多大于15 a, 极端降水指数的循环长度多小于10 a。

关键词

极端气候, 小波分析, 变化特征, Hurst指数

Variation Characteristics and Future Trend Prediction of Extreme Climate Events in Suqian

En Xu, Hang Zhou, Xin Cheng, Liuxian Song, Xiaomin Ding

Suqian Meteorological Bureau, Suqian Jiangsu

Received: Feb. 20th, 2024; accepted: Mar. 21st, 2024; published: Mar. 28th, 2024

Abstract

In this paper, based on daily precipitation, average temperature, and maximum and minimum tem-

文章引用: 徐恩, 周航, 程昕, 宋柳贤, 丁晓敏. 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. DOI: 10.12677/ccrl.2024.132039

perature data of 4 meteorological stations in Suqian City from 1961 to 2021, linear trend method, Mann-Kendall test, RClimDex model, wavelet analysis, and R/S are used to analyze the variation characteristics and trend prediction of 18 extreme temperature and precipitation indexes. The results are as follows: 1) Both extreme high temperature and extreme low temperature showed an increasing trend, while the daily temperature range showed a decreasing trend; the frequency and sustainability of extreme high-temperature (low-temperature) events showed an increasing (decreasing) trend; 2) The intensity and frequency of extreme precipitation events are marginally increasing, while their sustainability has decreased slightly; 3) The increase in temperature for the extreme temperature cold indexes is higher than that of the warm indexes, while the increase in temperature for the night indexes is higher than that of the day indexes; 4) From a periodic perspective, the extreme temperature indexes exhibit a periodic variation of 2~6 a, while the extreme precipitation indexes display a periodic variation of about 2 a; 5) The R/S analysis shows that the state of climate warming in Suqian area will continue to persist, the trends of future increase or decrease of extreme precipitation indexes are inconsistent, and the average cycle length of the extreme temperature indexes is mostly greater than 15 a, while the cycle length of the extreme precipitation indexes are mostly less than 10 a.

Keywords

Extreme Climate, Wavelet Analysis, Variation Characteristics, Hurst Index

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

2023年3月,根据IPCC发布的第六次评估报告,2011~2020年全球地表平均气温较1850~1900年上升了 1.1°C [1]。全球气温的持续上升和极端气候事件的频发,已经成为影响人类社会可持续发展的重要议题。相较于平均气候状况,极端气候事件突发性更强、影响范围更广泛、预测难度更大[2],因此,在全球气候变暖的背景下,我们需要加强对极端气候事件的研究,以便更好地应对这一挑战。

已有研究表明,全球范围内,极端高温事件的频次和强度均呈现出明显的上升趋势,与此同时,极端低温事件的频次则呈现下降趋势,然而,其强度却在不断增强[3][4][5]。在我国,极端气候事件的变化也较为显著,导致了近几十年来我国遭遇极端高温、干旱和热浪频次的显著增加[6]。从大区域空间尺度的角度来看,我国北方地区气温极端化的现象相较于南方地区更为显著[7]。在江淮流域,极端气温指数在南北方向上呈现出梯度变化的特征,其中最高温度分布在浙江、江西地区,长江以北地区极端冷指数下降,较长江以南更加明显[8]。

在全球气候持续变暖的背景下,全球水循环受到深刻影响,进而导致全球范围内极端降水事件也不断增多[9]。近50年来,中国极端降水事件明显增多[10],强降水和极强降水量呈现出上升趋势,极端降水强度也显著增强[11]。值得注意的是,我国极端降水事件的区域差异较为明显。研究显示,在长江流域、西北地区和东南地区,近年来极端降水的趋势呈现出逐年增加的态势,而西南、华北以及东北部分地区的极端降水则表现出减少的趋势[12]。

宿迁市地处江苏北部,沂沭泗流域和淮河流域的下游,属暖温带季风气候区,四季分明,季风盛行。宿迁市年均气温在 $14.7\sim 15.3$ 之间,无霜期长,年平均降水量为 898.7 mm ,年内降水主要集中于夏季,占全年的60%左右。本文根据宿迁市4个地面气象观测站1961~2021年逐日平均气温、降水量、最高和

最低气温数据, 选取 ETCCDI 推荐的 18 个极端气候指数, 其中包括 11 个极端气温指数和 7 个极端降水指数, 并用线性倾向估计法、M-K 突变检验、滑动 T 检验、RClimDex 模型、小波分析和 R/S 分析等对宿迁市极端气候(气温和降水)事件进行了全方位深入的研究, 并对其未来趋势进行了预测, 以便更有效地应对极端天气的发生, 为宿迁市防灾减灾提供科学的依据。

2. 资料与方法

2.1. 资料

采用宿迁市 4 个地面气象观测站 1961~2021 年逐日平均气温、降水量、最高和最低气温数据, 计算由 ETCCDI 推荐的 11 个极端气温指数和 7 个极端降水指数, 选取的 18 个极端气候指数及其定义见表 1。

Table 1. Definition of extreme climate indexes

表 1. 极端气候指数的定义

类型	名称	代码	定义	单位	
极端气温指数	强度指数	极端最高气温	TXx	年内最高气温的最大值	℃
		极端最低气温	TNn	年内最低气温的最小值	℃
		气温日较差	DTR	日最高气温与日最低气温的差值	℃
	频率指数	冷昼日数	TX10p	日最高气温 < 10%分位值的天数	d
		冷夜日数	TN10p	日最低气温 < 10%分位值的天数	d
		暖昼日数	TX90p	日最高气温 > 90%分位值的天数	d
		暖夜日数	TN90p	日最低气温 > 90%分位值的天数	d
		高温日数	SU35	每年日最高气温 > 35℃的日数	d
		霜冻日数	FD0	每年日最低气温 < 0℃的日数	d
		持续时间指数	暖持续日数	WSDI	连续 6 日最高气温 > 90%分位值的日数
	冷持续日数		CSDI	连续 6 日最低气温 < 10%分位值的日数	d
极端降水指数	强度指数	单日最大降水量	RX1day	每年内最大日降水量	mm
		5 日最大降水量	RX5day	每年内连续 5 日最大降水量	mm
		强降水量	R95p	降水量 > 95%分位值的总量	mm
		降水强度	SDII	降水量 ≥ 1 mm 的总量与天数的比值	mm/d
	频率指数	暴雨日数	R50	一年内日降水量 > 50 mm 的日数	d
	持续时间指数	连续干旱日数	CDD	降水量 < 1 mm 最长连续日数	d
		连续湿润日数	CWD	降水量 ≥ 1 mm 最长连续日数	d

2.2. 研究方法

运用线性拟合对极端气候指数进行趋势分析; 利用小波分析方法[13] [14]研究宿迁地区 61 a 极端气温与降水指数的周期特性, 小波能量谱能揭示时间序列在不同时间尺度上的周期变化, 并呈现出这些周期变化在时间域上的分布情况; 利用 R/S 分析法计算极端气候指数的 Hurst 指数[15] [16]和非周期性循环的平均循环长度[17] [18] [19], 不同 Hurst 指数的 H 值意味着不同的趋势变化, 当 $0 < H < 0.5$ 时, 时间序列的未来变化趋势与过去呈相反态势; 当 $0.5 < H < 1$ 时, 时间序列的未来变化趋势与过去的变化趋势保持一致。Hurst 指数具体分级标准见表 2。

Table 2. Hurst index classification
表 2. Hurst 指数分级

等级	Hurst 指数值域	持续性强度	等级	Hurst 指数值域	持续性强度
1	$0.50 < H \leq 0.55$	很弱	1	$0.45 \leq H < 0.50$	很弱
2	$0.55 < H \leq 0.65$	较弱	2	$0.35 \leq H < 0.45$	较弱
3	$0.65 < H \leq 0.75$	较强	3	$0.25 \leq H < 0.35$	较强
4	$0.75 < H \leq 0.80$	强	4	$0.20 \leq H < 0.25$	强
5	$0.80 < H \leq 1.00$	很强	5	$0.00 \leq H < 0.20$	很强

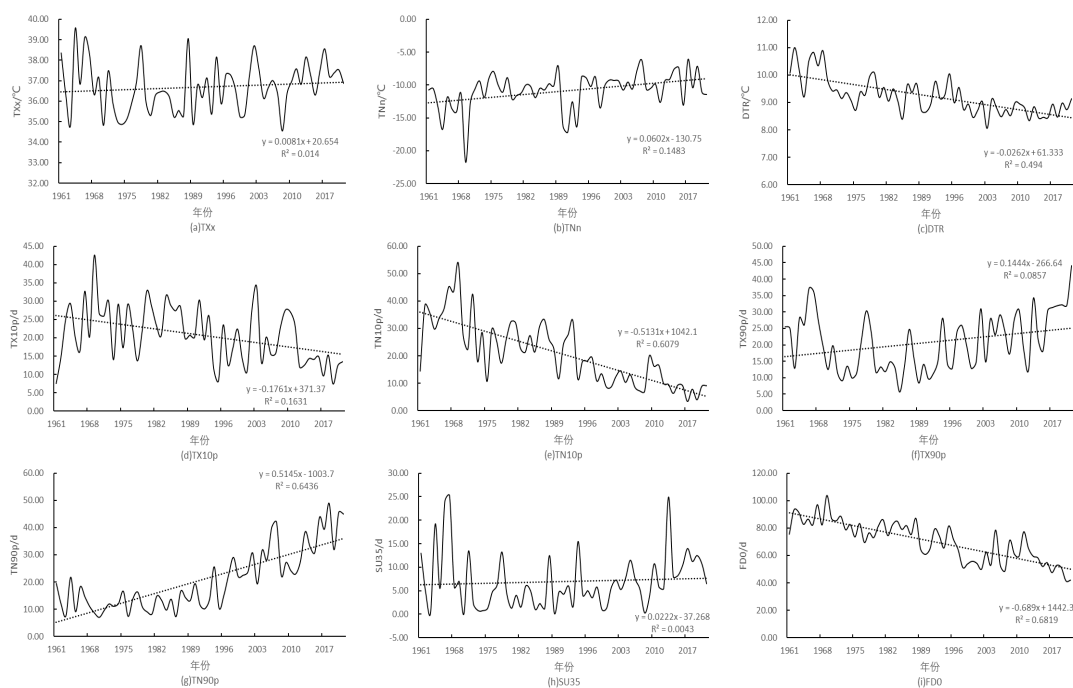
3. 结果分析

3.1. 极端气温指数变化特征研究

3.1.1. 年际变化趋势特征

1961 年以来, 宿迁地区极端气温强度指数中, 日最高气温极大值(TXx)和日最低气温极小值(TNn)均呈上升趋势(图 1(a)~(b)), 表明宿迁气温升高, 呈增暖趋势, 但是 TNn 的变幅明显高于 TXx, 呈显著不对称性, TXx 近 61 a 来上升趋势不显著($P > 0.05$), 气候倾向率为 $0.08^\circ\text{C}/10 \text{ a}$; TNn 近 61 a 来呈显著增加趋势($P < 0.01$), 气候倾向率为 $0.6^\circ\text{C}/10 \text{ a}$; 气温日较差(DTR)具有显著下降趋势($P < 0.01$), 气候倾向率为 $-0.26^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ (图 1(c))。

极端气温的频率指数变化十分显著。其中, 冷相关指数的冷昼(TX10p)、冷夜(TN10p)、霜冻日数(FD0)均呈显著减少趋势($P < 0.01$)(图 1(d)~(e), 图 1(i)), 其气候倾向率分别为 $-1.76 \text{ d}/10 \text{ a}$, $-5.13 \text{ d}/10 \text{ a}$, $-6.89 \text{ d}/10 \text{ a}$ 。暖相关指数中, 暖夜日数(TN90p)以显著趋势上升($P < 0.01$)(图 1(g)), 其增加速率为 $5.15 \text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。暖昼日数(TX90p)也呈现显著上升趋势($P < 0.05$), 其增加速率为 $1.44 \text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。超过 35°C 的高温日数(SU35)变化趋势不显著(图 1(h)), 近 61 a 来存在两个峰值区间, 分别位于 1961~1970 年和 2014~2015 年, 1970 s~2010 s 之间整体呈小幅波动的态势。



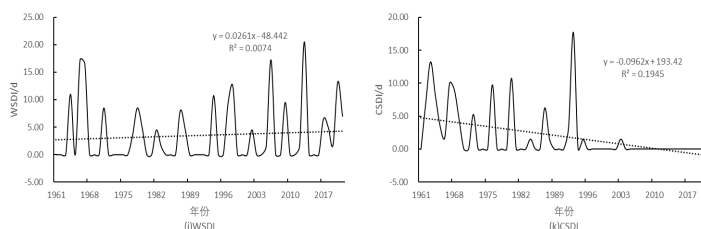


Figure 1. Variation trend of extreme temperature indexes in Suqian over the past 61 years (1961~2021)
图 1. 近 61 年来(1961~2021)宿迁极端气温指数变化趋势

极端气温持续时间指数中, 暖持续日数(WSDI)总体呈缓慢上升趋势(图 1(j)), 冷持续日数(CSDI)呈显著减少趋势($P < 0.01$)(图 1(k)), 从趋势图上可以看出, 1996 年至今, 除了 2003 年 6 天, 冷持续日数一直为 0 d。

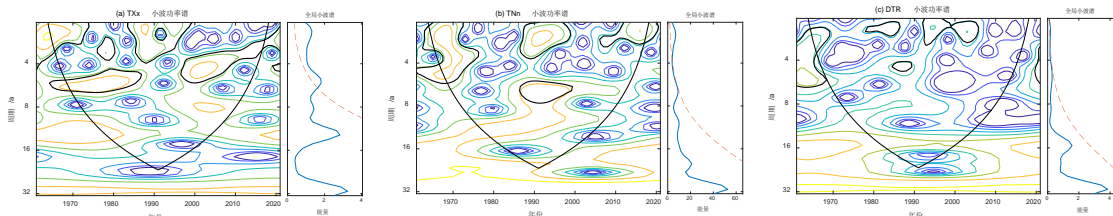
综合以上分析, 近 61 年来, 宿迁地区极端高温和极端低温均呈增加趋势, 极端低温升温幅度大于极端高温, 同时气温日较差呈减小趋势。对于极端高温事件, 无论是频率指标, 还是持续性指标, 均呈上升趋势, 而极端低温事件的频率指标和持续性指标都呈下降趋势。在各极端气温指数中, 暖夜日数上升速率最快, 霜冻日数下降速率最快。

3.1.2. 周期分析

由小波功率谱可知(图 2(a)), TXx 存在 4 个显著聚集中心, 其中心坐标分别为: (6, 1975)、(3, 1978)、(2, 1992)和(5, 2004)。同时, 以每个坐标为中心的小波能量在时域尺度上的强集中影响范围分别是 1965~1987 年、1976~1981 年、1983~1999 年和 1998~2021 年。从全局小波谱中可以看出, TXx 存在 2 a、6 a、14 a 和 32 a 左右的周期, 其中 2 a 和 6 a 周期通过了 95% 显著性水平检验, 而 6 a 震荡周期表现得尤为显著, 因此 TXx 的主周期为 6 a 左右。

TNn 也存在 4 个主要的聚集中心(图 2(b)), 其中心坐标分别为: (4, 1972)、(2, 1991)、(7, 1991)和(2, 2012)。以(4, 1972)为中心的气温指数小波能量呈现出强烈的集中态势, 其影响范围主要集中在 1961~1976 年, 以(2, 1991)和(7, 1991)为中心的强集中影响范围均是 1986~2000 年, 以(2, 2012)为中心的强集中影响范围均是 2006~2020 年。从小波谱中看出, TNn 具有 2 a 和 32 a 的振荡周期, 其中 2 a 左右的振荡周期在 95% 的显著性水平上通过了检验, 因此可以确定 TNn 的主周期约为 2 a。

从图 2(c)可以看出, DTR 存在 4 个主要的聚集中心, 其中心坐标分别为(4, 1966)、(2, 1982)、(5, 1988)和(2, 2000), 这些中心的强集中影响范围为 1961~1970、1978~1986、1984~1990 和 1992~2005 年。但以(4, 1966)为中心的边界效应影响时段为 1961~1968 年。从全局小波谱中看出, DTR 存在 2 a、16 a 和 32 a 的振荡周期, 其中 2 a 周期通过 95% 显著水平检验, 因此 DTR 的主周期约为 2 a。其他极端气温指数的小波能量谱特征详见表 3。



注: 黑色细实线为边界效应影响范围, 红色虚线区域表示通过 95% 信度的显著性检验。

Figure 2. Wavelet energy spectrum distribution of extreme temperature intensity indexes in Suqian over the past 61 years (1961~2021)

图 2. 近 61 年来(1961~2021)宿迁极端气温强度指数小波能量谱分布

Table 3. Time-frequency characteristics of wavelet energy spectrum of other extreme temperature indexes in Suqian area
表 3. 宿迁地区其他极端气温指数的小波能量谱时频特征

指数	集中影响年份	尺度中心/a	存在周期/a	主周期/a
TX10p	1961~1982, 1990~2006, 1995~2010	2, 4, 6	2, 6, 20	6
TN10p	1967~1977	2	20, 32	无
TX90p	1990~2018, 2000~2008	4, 2	4, 10, 20, 32	4
TN90p	2004~2008	2	20, 32	无
SU35	1961~1975, 1985~1995, 2006~2016	4, 2, 2	2, 6, 12, 32	2
FD0	1967~1972, 2003~2011	1, 3	20	无
WSDI	1961~1974, 1990~2021	4, 4	4, 6	4
CSDI	1961~1996	4	4, 16, 32	4

3.2. 极端降水指数变化特征研究

3.2.1. 年际变化趋势特征

近 61 a 来宿迁地区极端降水强度指数(RX1day、RX5day、R95p、SDII)均呈上升趋势(图 3(a)~(d)), 上升速率分别为 3.14 mm/10 a、5.09 mm/10 a、9.53 mm/10 a 和 0.3mm·d⁻¹/10 a, 均未通过 0.05 显著性水平检验, 上升趋势不显著; 表征极端降水频率的暴雨日数 R50, 近 61 a 呈缓慢上升趋势(图 3(e)) (P < 0.05), 气候倾向率为 0.079 d/10 a; 表征降水持续时间的两个指数近 61 a 来呈下降趋势(图 3(f)~(g)), 趋势变化不明显(P < 0.05), 但年际间波动较大, 连续无降水日数(CDD)全市平均在 39.97 d, 连续降水日数(CWD)平均在 5.22 天。综上, 表征极端降水强度和频率的指数呈上升趋势, 持续时间指数呈下降趋势, 说明宿迁地区降水集中度提高。

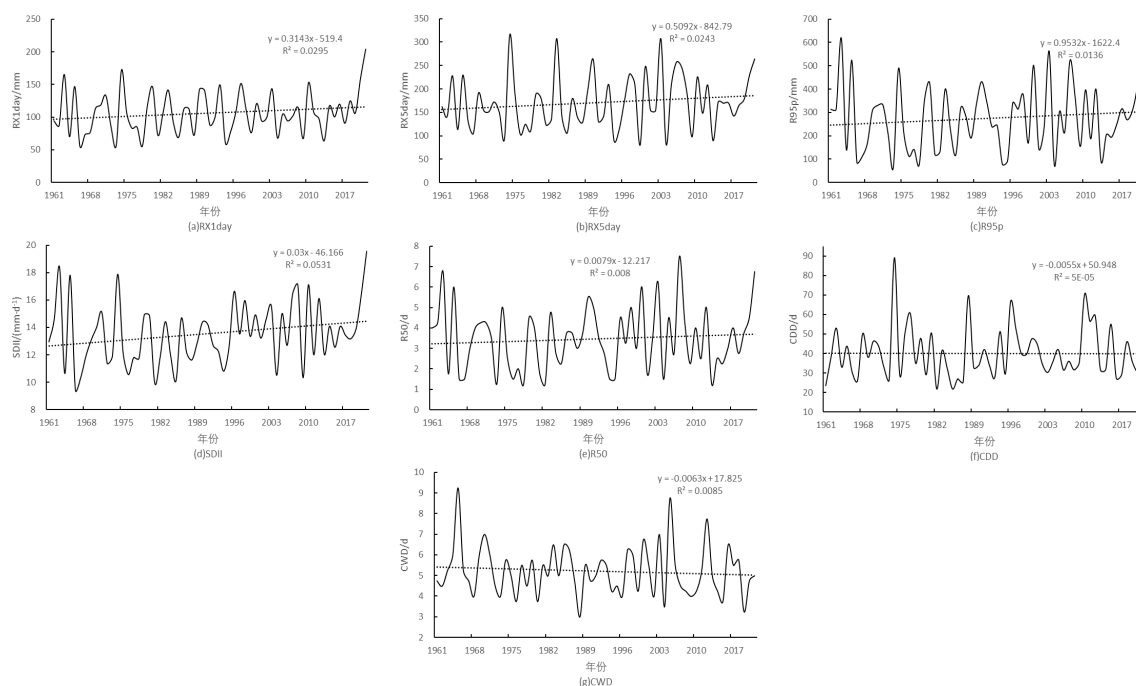
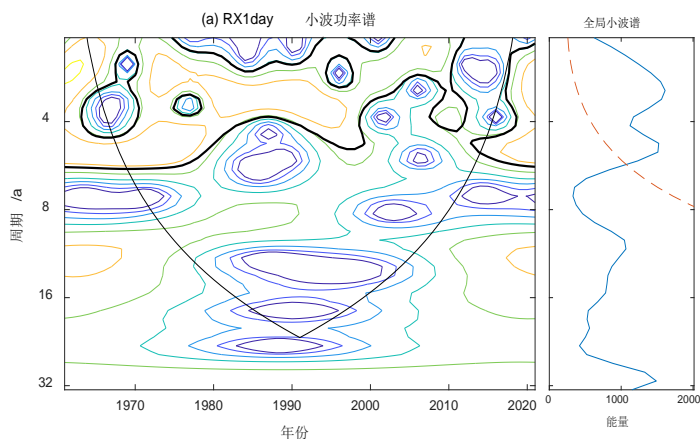


Figure 3. Variation trend of extreme precipitation indexes in Suqian over the past 61 years (1961~2021)
图 3. 近 61 年来(1961~2021)宿迁极端降水指数变化趋势

3.2.2. 周期分析

以 RX1day 为例, 分析宿迁市极端降水指数的周期变化特征, 结果见图 4。由图可知, RX1day 在 95% 的置信区间下有 1 个聚集中心, 其中心坐标为(3, 1985), 影响范围为 1961~2012 年。从小波谱中可以看出, RX1day 存在 2 a、5 a 和 10 a 左右的周期, 2 a 和 5 a 左右的振荡周期通过 0.05 显著性水平检验, 且它们的震荡强度相当, 因此 RX1day 的主周期为 2 a 和 5 a。其他极端降水指数的小波能量谱特征详见表 4。



注: 黑色细实线为边界效应影响范围, 红色虚线区域表示通过 95% 信度的显著性检验。

Figure 4. Wavelet energy spectrum distribution of extreme precipitation intensity index in Suqian over the past 61 years (1961~2021)

图 4. 近 61 年来(1961~2021)宿迁极端降水强度指数小波能量谱分布

Table 4. Time-frequency characteristics of wavelet energy spectrum of other extreme precipitation indexes in Suqian area
表 4. 宿迁地区其他极端降水指数的小波能量谱时频特征

指数	集中影响年份	尺度中心/a	存在周期/a	主周期/a
RX1day	1961~2012	3	2, 5, 10	2, 5
RX5day	1961~2015	2	2, 5, 8	2
R95p	1961~1990, 1995~2015	4, 2	2, 5	2
SDII	1961~1988, 1994~2015	4, 2	2, 5, 14	2
R50	1961~1990, 1995~2015	4, 2	2, 5	2
CWD	1961~1978, 1982~1990, 1995~2021	6, 3, 7	2, 5, 7	7
CDD	1961~1998, 2005~2021	2, 3	2, 20	2

4. 极端气候指数变化趋势预测

4.1. 极端气温指数

应用 R/S 分析法计算了极端气温指数的 Hurst 指数(见表 5), 结果表明, 宿迁地区各极端气温指数的 Hurst 指数均大于 0.5, 表现为各气温序列具有长程相关性, 即未来一段时间范围内, 宿迁地区各极端气温指数的变化情况与过去 61 a 的趋势相同。其中, DTR、TN10p、TX90p、TN90p、FD0 的 H 值为 >0.8, 表现出了很强的持续性, TXx、TNn、TX10p、SU35、CSDI 的 H 值为 0.7~0.8, 表现出强或较强的持续性, 只有 WSDI 的 H 值接近 0.5, 持续性特征很弱。结合前述分析, 可知极端气温持续上升, 极端高温

事件的强度(TX_x、TN_n)、频率(TN90p、TX90p、SU35)和持续性(WSDI)持续增大, 极端低温事件的频率(TN10p、TX10p、FD0)和持续性(CSDI)持续减小。

Table 5. R/S analysis of extreme temperature indexes in Suqian area
表 5. 宿迁地区极端气温指标的 R/S 分析

极端气温指标		Hurst 指数
强度指标	TX _x	0.701 (较强)
	TN _n	0.719 (较强)
	DTR	0.916 (很强)
频率指标	TX10p	0.779 (强)
	TN10p	0.960 (很强)
	TX90p	0.894 (很强)
	TN90P	0.991 (很强)
	SU35	0.762 (强)
	FD0	1 (很强)
持续时间指标	WSDI	0.549 (很弱)
	CSDI	0.732 (较强)

4.2. 极端降水指数

宿迁地区极端降水指数的 Hurst 指数如表 6 所示, RX1day、RX5day、CDD、CWD 呈现反持续性, R95p、R50 和 SDII 表现为持续性, 结合趋势图可知宿迁地区的 R95p、SDII、R50、CWD、CDD 未来呈增大趋势, RX1day、RX5day 呈减小趋势, 但是与极端气温指数相比, 极端降水指数在持续性和反持续性方面表现出较弱或很弱的特征。

Table 6. R/S analysis of extreme precipitation indexes in Suqian area
表 6. 宿迁地区极端降水指标的 R/S 分析

极端降水指标		Hurst 指数
强度指标	RX1day	0.362 (较弱)
	RX5day	0.432 (较弱)
	R95p	0.599 (较弱)
	SDII	0.748 (较强)
频率指标	R50	0.618 (较弱)
持续时间指标	CWD	0.428 (较弱)
	CDD	0.482 (很弱)

4.3. 平均循环长度

Hurst 指数仅能揭示时间序列的未来趋势, 无法确定这种趋势的持续时间, 为此, 我们使用统计量 V 来计算平均循环长度, 以反映过去趋势对未来的影响时长。本文以气温日较差指数(DTR)为例, 图 5 中, 箭头所示的首个明显转折点, 即代表系统的平均循环长度。对于气温日较差指数, 其平均循环长度为 16

a, 意味着在 16 a 后, 该指数将不再依赖初始数据。其他极端气候指数的平均循环长度详见表 7。从表 5~7 中我们可以看到, 对于同一指数, 其持续性特征与平均循环长度之间存在密切关联, 当一个指数的持续性越强时, 其平均循环长度也越长。整体上, 极端气温指数的平均循环长度多大于 15 a, 而极端降水指数的循环长度多小于 10 a, 极端气温指数的平均循环长度普遍大于极端降雨指数, 这意味着极端气温指数对未来趋势的影响时间更为持久。

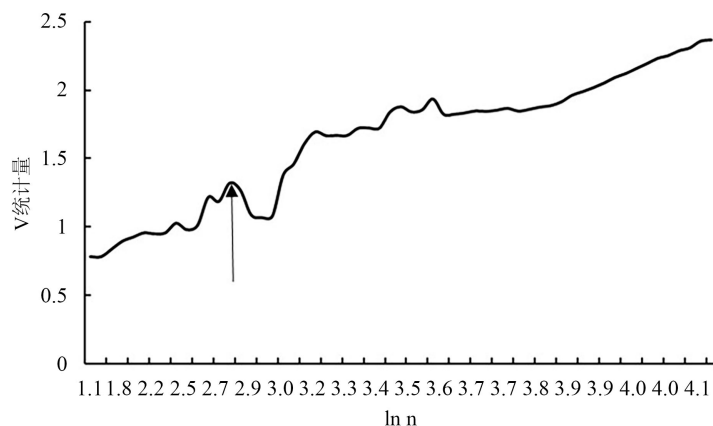


Figure 5. V-ln n curve graph of daily temperature range (DTR)

图 5. 气温日较差(DTR)的 V-ln n 曲线

Table 7. Non-periodic cycle length of extreme climate indexes in Suqian area

表 7. 宿迁地区极端气候要素非周期循环长度

极端气候指标		非周期循环长度(年)	
极端气温指数	强度指标	TXx	9
		TNn	13
		DTR	16
	频率指标	TX10p	15
		TN10p	17
		TX90p	13
		TN90P	15
		SU35	15
		FD0	22
	持续时间指标	WSDI	5
CSDI		15	
极端降水指数	强度指标	RX1day	6
		RX5day	4
		R95p	6
	频率指标	SDII	11
		R50	10
	持续时间指标	CWD	4
		CDD	5

5. 结论

在气候变化作用下, 宿迁地区极端气候事件加剧。本研究基于实测气象站点数据资料探讨分析了1961~2021年间宿迁地区极端气候历史变化趋势和演变特征, 预测了极端气候事件的未来变化趋势, 以期为宿迁地区的防灾减灾工作提供帮助。主要结论如下:

1) 近61 a来, 宿迁地区极端高温和极端低温均呈增加趋势, 极端低温升温幅度大于极端高温, 同时气温日较差呈减小趋势。对于极端高温事件, 无论是频率指标, 还是持续性指标, 均呈上升趋势, 而极端低温事件的频率指标和持续性指标均呈下降趋势。此外, 极端降水事件的强度和频率呈微弱的上升趋势, 持续性呈微弱的下降趋势。

2) 冷暖指数和昼夜指数在变化幅度上存在明显差异和不对称性。具体来说, 冷指数的升温趋势明显高于暖指数, 而夜指数的升温幅度也超过昼指数。

3) 从周期性来看, 极端气温指数多存在2~6 a、20 a和32 a的周期变化, 但只有2~6 a的周期通过了95%显著性水平检验; 极端降水指数多存在2 a和5 a的周期变化, 其中2 a左右的周期通过了95%显著性水平检验。

4) 将极端气候指数的历史变化趋势与Hurst指数叠加, 可预测未来宿迁地区极端气温持续上升, 极端高温(低温)事件的强度、频率和持续性持续增大(减小), 宿迁地区气候变暖的状态仍继续保持; 极端降水事件中R95p、SDII、R50、CWD、CDD未来呈增大趋势, RX1day、RX5day呈减小趋势。极端气温指数的平均循环长度多大于15 a, 而极端降水指数的循环长度多小于10 a。

基金项目

本文受到宿迁市气象局科研项目(SQ202205)的资助。

参考文献

- [1] 高启慧, 秦圆圆, 梁媚聪, 等. IPCC第六次评估报告综合报告解读及对我国的建议[J]. 环境保护, 2023, 51(Z2): 82-84.
- [2] 关颖慧. 长江流域极端气候变化及其未来趋势预测[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015.
- [3] Boccolari, M. and Malmusi, S. (2013) Changes in Temperature and Precipitation Extremes Observed in Modena, Italy. *Atmospheric Research*, **122**, 16-31. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.022>
- [4] Keggenhoff, I., Elizbarashvili, M., Amiri-Farahani, A. and King, L. (2014) Trends in Daily Temperature and Precipitation Extremes over Georgia, 1971-2010. *Weather and Climate Extremes*, **4**, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.05.001>
- [5] Tong, S.Q., Li, X.Q., Zhang, J.Q., et al. (2019) Spatial and Temporal Variability in Extreme Temperature and Precipitation Events in Inner Mongolia (China) during 1960-2017. *Science of the Total Environment*, **649**, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.262>
- [6] 王晓利. 中国沿海极端气候变化及其对NDVI的影响特征研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [7] You, Q.L., Kang, S.C., Aguilar, E., et al. (2011) Changes in Daily Climate Extremes in China and Their Connection to the Large Scale Atmospheric Circulation during 1961-2003. *Climate Dynamics*, **36**, 2399-2417. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0735-0>
- [8] 吴晶璐, 朱红芳, 宗培书, 等. 近30多年江淮流域极端气温指数的时空变化分析: 站点观测和再分析的对比[J]. 气象科学, 2018, 38(4): 464-476.
- [9] Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., et al. (2014) 21st Century Climate Change in the European Alps—A Review. *Science of the Total Environment*, **493**, 1138-1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>
- [10] 武文博, 游庆龙, 王岱. 基于均一化降水资料的中国极端降水特征分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(6): 1015-1026.
- [11] 蒋卓亚. 中国极端气温及降水事件的时空特征研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [12] 高涛, 谢立安. 近50年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(5): 577-589.

-
- [13] Orrence, C. and Compo, G.P. (1998) A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**, 61-78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079%3C0061:APGTWA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079%3C0061:APGTWA%3E2.0.CO;2)
- [14] Zhi, X.F. (2000) Interannual Variability of the Indian Summer Monsoon and Its Modeling with a Zonally Symmetric 2D-Model. Shaker Verlag, Aachen, 152.
- [15] 鲁菁, 张玉虎, 高峰, 等. 近 40 年三江平原极端降水时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 272-282. <https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2019.02.039>
- [16] 史雯雨, 杨胜勇, 李增永, 等. 近 57 年金沙江流域气温变化特征及未来趋势预估[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 211-217. <https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2021.01.027>
- [17] 李国栋, 张俊华, 王乃昂, 等. 基于重标极差分析和非周期循环分析的气候变化趋势预测——以兰州市为例[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2): 299-307. <https://doi.org/10.13866/j.azr.2013.02.021>
- [18] 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.
- [19] 高绍鑫, 刘静, 常煜. 内蒙古地区四季和年降水量趋势分析[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(4): 426-433.