DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.03.005

气候变暖背景下宁夏高温天气特征分析

李晓虹[1,2,3], 姚姗姗[1,2,3*], 翟颖佳[1,2,3], 尚 艳[1,2,3]
(1.中国气象局 旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室,宁夏 银川 750000;
2.宁夏气象防灾减灾重点实验室,宁夏 银川 750000;3.宁夏气象台,宁夏 银川 750002)

摘 要:利用1961—2024年宁夏21个国家气象站逐日最高气温资料,采用气候倾向率、M-K检验、小波分析等方法,分析了宁夏高温天气的时空变化特征。结果表明:(1)宁夏高温天气主要出现在引黄灌区和中部干旱带,高温日数增多、强度增强,呈明显的增加增强趋势。(2)1961年以来,引黄灌区高温日数增加幅度为1.23 d/10 a,于2009年发生突变,突变后增至3.26 d/10 a;中部干旱带高温日数增加幅度为0.33 d/10 a,于2014年发生突变,突变后增至0.47 d/10 a;引黄灌区极端最高气温增加幅度为0.48 ℃/10 a,中部干旱带为0.21 ℃/10 a。(3)高温日数存在以60 a左右为主的振荡周期;引黄灌区极端最高气温存在以60 a左右为主的振荡周期,中部干旱带则存在以24 a左右为主的振荡周期。

关键词:高温日数;极端最高气温;宁夏
中图分类号:P467 **文献标志码:**A

气候变暖已成为全球气候变化的主要特征[1],是当前人类所面临的最大环境挑战之一[2],对人类社会生产生活具有重大影响[3-4]。世界气象组织2023年5月17日发布的报告警告称,未来五年全球气温可能创下新高,并突破《巴黎协定》设定的1.5 ℃升温上限。在全球变暖背景下,极端天气气候事件发生频次增加,高温热浪日益频繁,对人类健康、生态环境及经济社会可持续发展构成严重威胁。李青春[5]、张英娟等[6]分析了北京高温时长的空间分布及年代际、季节内与日内等多时间尺度变化特征,发现北京夏季高温日数较多、高温时长较长的区域主要位于中心城区及以南,西部和北部高温日数较少、高温时长较短。史桂芬等[7]分析了商丘市高温时空分布特征,发现其高温日数总体呈自东南向西北逐渐减少的趋势。候启等[8]分析了山东省近60 a高温热浪日数和强度的时空特征,发现二者均存在明显的区域差异。张君枝等[9]采用不同统计方法分析了京津冀地区近40 a极端高温事件的时空分布特征,发现该地区极端高温事件强度增强、频次增加,并呈年代际波动变化。雷正翠等[10]分析了苏南地区近65 a高温的变化规律和周期性,发现高温日数呈年代际波动特征。针对宁夏高温天气的研究主要集中在高温形成的天气气候特征、城市发展与热岛效应的关系等方面[11-13],部分学者对石嘴山市和枸杞种植区的高温特征开展了分析[14-15],但关于宁夏长时间序列高温特征的研究仍较少。本文基于宁夏全区长时间序列气象观测资料,分析高温天气的时空变化特征,旨在为应对气候变暖、科学防范高温灾害提供参考。

1 研究区概况

宁夏位于我国西北黄河中上游地区,地处北纬35°14′—39°23′、东经104°17′—107°39′,地形南北狭长,海拔在1 000 m以上,地势总体南高北低;深居内陆,位于中国季风区西缘,属典型大陆性气候,年平均气温为6.3~11.4 ℃,年平均降水量为164.1~739.4 mm[16]。

本文根据宁夏自然地理及气候特点,将研究区

收稿日期:2024-11-09
基金项目:中国气象局决策气象服务专项项目(JCZX2024023)
作者简介:李晓虹(1987—),女,高级工程师,硕士,主要从事决策气象服务、气候变化等研究(290141608@qq.com)。
* **通信作者:**姚姗姗(1990—),女,工程师,主要从事决策气象服务研究(1031109686@qq.com)。
引用格式:李晓虹,姚姗姗,翟颖佳,等.气候变暖背景下宁夏高温天气特征分析[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(3):227-233.

域划分为 3 个区域(图 1):①引黄灌区,包括银川市,石嘴山市,吴忠市的青铜峡市、利通区,中卫市沙坡头区北部及中宁县北部;②中部干旱带,主要包括吴忠市红寺堡区、同心县、盐池县,中卫市沙坡头区中南部、中宁县南部及海原县;③南部山区,包括固原市全境。

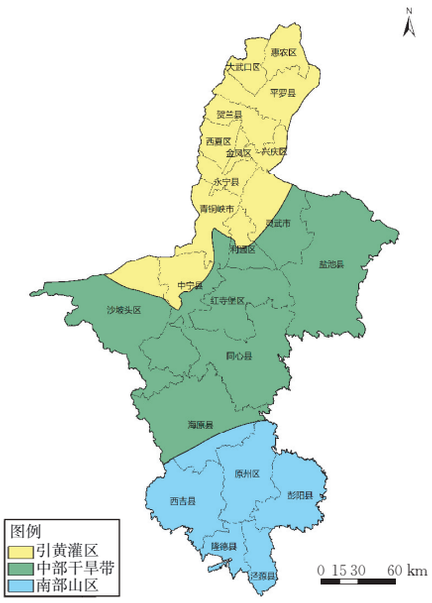


图 1 宁夏 3 个区域分布示意图(审图号:GS(2022)3124 号)

Fig. 1 Spatial distribution of the three regions in Ningxia (Map approval No. GS(2022)3124)

2 资料与方法

2.1 资料说明

本文采用 1961—2024 年宁夏 21 个国家气象站逐日最高气温资料,其中引黄灌区 11 站(惠农站、平罗站、陶乐站、贺兰站、银川站、永宁站、灵武站、吴忠站、青铜峡站、中卫站、中宁站),中部干旱带 6 站(兴仁站、盐池站、麻黄山站、海原站、同心站、韦州站),南部山区 4 站(西吉站、彭阳站、隆德站、泾源站)。资料来源于宁夏气象局气象信息中心,均经过严格质量控制。高温日数指最高气温≥35 ℃的日数,极端最高气温为研究时段内各区域范围内的日最高气温最大值。

2.2 研究方法

2.2.1 气候倾向率 气候倾向率(X)一般采用一元线性方程表示,其公式为

$$X=a_0+a_1t, \tag{1}$$

式中:a_0 为常数;a_1 为斜率,代表线性变化趋势;t 为对应的年份。通常将 a_1 的值放大 10 倍代表气候倾向率[17]。

2.2.2 Mann-Kendall 检验 Mann-Kendall(M-K)检验是一种非参数统计方法,广泛应用于气象等领域,用于检测时间序列的趋势及突变。在 M-K 趋势检验中,UF 和 UB 分别指的是正向和反向统计量序列,它们用于帮助识别时间序列中的趋势变化点,显著性水平 $\alpha=0.05$。具体来说,对于每个时间点,UF 值表示到该点为止序列的趋势方向和强度,UF>0 表示在这个时间点之前的时间序列显示出上升趋势,超过显著性水平,则趋势显著;相反则表示下降趋势。将 UF 和 UB 曲线绘制在同一图中,若二者在显著性水平内相交,则交点为显著突变点。

2.2.3 小波分析 小波分析已广泛应用于气象领域[18-20],其在时域、频域均具有局部分析能力,可揭示气象序列的多时间尺度周期特征。小波函数 $\Psi(t)$ 具有振荡性,且能迅速衰减至零,其定义为

$$\int_{-\infty}^{+\infty}\Psi(t)\mathrm{d}t=0。 \tag{2}$$

$\Psi(t)$ 基于时间域平移和尺度域伸缩形成一簇函数系,即

$$\Psi_{a,b}(t)=|a|^{-1/2}\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)。 \tag{3}$$

式中:$\Psi_{a,b}(t)$ 为基小波函数,$b\in R$,$a\in R$,$a\neq 0$;a 为尺度因子,反映小波的周期长度;b 为时间因子,反映小波在时间上的平移。

本研究小波函数采用 Morlet 函数,即

$$\Psi(t)=\mathrm{e}^{ict}\mathrm{e}^{-t^2/2}。 \tag{4}$$

式中:c 为常数,取值为 6.2;i 为虚数单位。

对于选定的小波函数,时间序列 $f(t)$ 的连续小波变换为

$$W_f(a,b)=|a|^{-1/2}\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\,\overline{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t。 \tag{5}$$

式中:$\overline{\Psi}(t)$ 为 $\Psi(t)$ 的复共轭函数;$W_f(a,b)$ 为小波变换系数。

小波变换系数的平方值在时间域上积分即为小波方差:

$$\mathrm{Var}(a)=\int_{-\infty}^{+\infty}\left|W_f(a,b)\right|^2\mathrm{d}b。 \tag{6}$$

3 结果与分析

3.1 高温天气空间分布特征

3.1.1 高温日数 1961—2024 年宁夏高温日数统计表明,引黄灌区高温日数最多,年平均为 1.4(青铜峡站)~5.0 d(中宁站);中部干旱带次之,年平均为 0.1 d(麻黄山站、海原站)~3.8 d(同心站);南部山区的西吉站、隆德站、泾源站未出现高温,仅彭阳站在个别年份出现高温天气,但该站 2007 年之后

才有完整的气象数据,数据序列较短。

3.1.2　极端最高气温　1961—2024 年宁夏极端最高气温统计表明,引黄灌区极端最高气温为 38.7(惠农站、灵武站)~41.0 ℃(吴忠站);中部干旱带次之,极端最高气温为 35.6(海原站)~39.0 ℃(同心站)。

3.2　高温天气时间变化特征

3.2.1　高温天气年代际变化　图 2 为 1961—2020 年宁夏年均高温日数年代际变化图。由图 2 可知:20 世纪 60—80 年代,引黄灌区年均高温日数在 0.61~1.79 d 波动,进入 90 年代后逐步增加,21 世纪 10 年代增至 5.95 d;中部干旱带与引黄灌区的变化特征基本一致,但没有引黄灌区的增幅大。

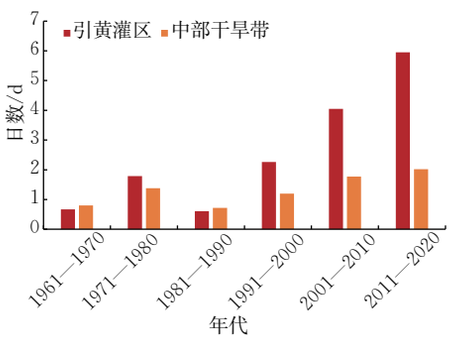


图 2　1961—2020 年宁夏年均高温日数年代际变化

Fig. 2　Interdecadal variation in the annual mean number of high-temperature days in Ningxia from 1961 to 2020

图 3 为 1961—2020 年宁夏极端最高气温年代际变化。由图 3 可知:20 世纪 60—80 年代,引黄灌区极端最高气温在 36.8~37.9 ℃波动,中部干旱带则由 38.1 ℃逐步降至 36.6 ℃。进入 90 年代后,引黄灌区极端最高气温有所升高,21 世纪 10 年代升至 41.0 ℃;中部干旱带极端最高气温在 37.5~39.0 ℃波动。

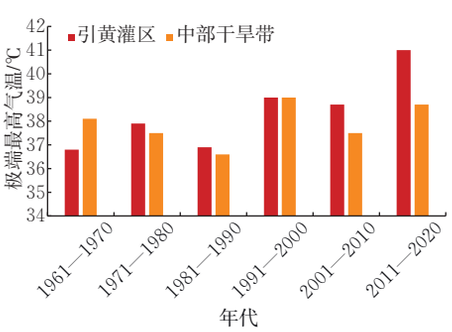
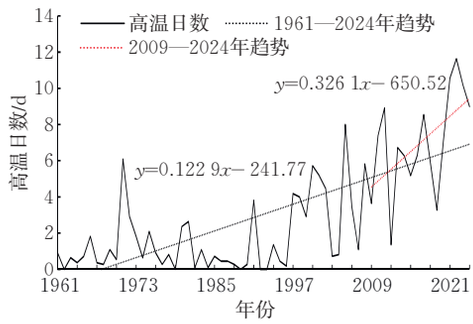


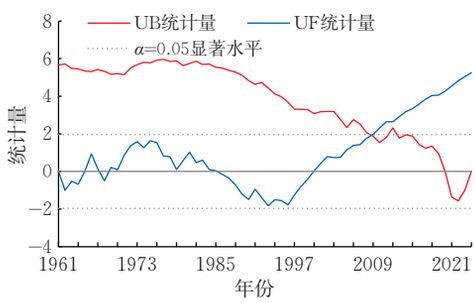
图 3　1961—2020 年宁夏极端最高气温年代际变化

Fig. 3　Interdecadal variation of the extreme maximum temperature in Ningxia from 1961 to 2020

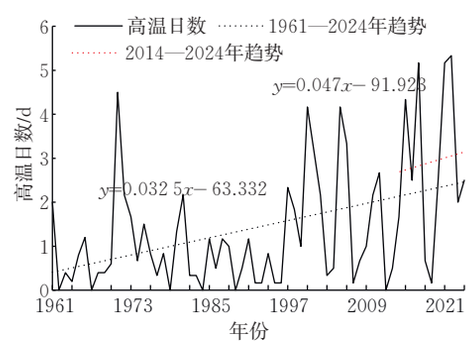
3.2.2　高温天气年际变化　图 4 为 1961—2024 年宁夏高温日数年际变化及 M-K 检验。由图 4 可知:1961—2024 年引黄灌区年平均高温日数为 3.0 d,中部干旱带为 1.4 d;2022 年高温日数最多,引黄灌区为 11.6 d,中部干旱带为 5.3 d;1962、1979 和 1989 年没有出现高温天气。



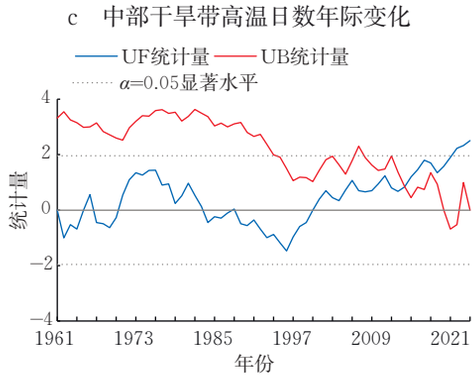
a　引黄灌区高温日数年际变化



b　引黄灌区高温日数M-K检验



c　中部干旱带高温日数年际变化



d　中部干旱带高温日数M-K检验

图 4　1961—2024 年宁夏高温日数年际变化及 M-K 检验

Fig. 4　Interannual variation in the number of high-temperature days and the M-K test results for Ningxia from 1961 to 2024

从逐年变化来看,引黄灌区和中部干旱带高温日数均呈增多趋势,引黄灌区增幅大于中部干旱带。1961 年以来,引黄灌区高温日数增幅为 1.23 d/10 a,2000 年前高温日数呈波动变化,2000 年后明显增加,2009 年这种增加趋势通过了 α=0.05 显著性检验;根据 UF 和 UB 曲线交点的位置,确定引黄灌区高温日数在 2009 年发生突变,突变后增幅变为 3.26 d/10 a。1961 年以来,中部干旱带高温日数增幅为 0.33 d/10 a,于 2014 年发生突变,突变后增幅变为 0.47 d/10 a。

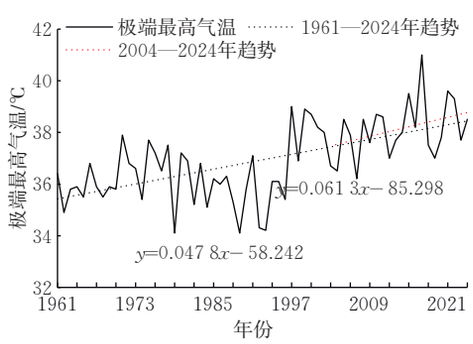
图 5 为 1961—2024 年宁夏极端最高气温年际变化及 M-K 检验。由图 5 可知:1961—2024 年引黄灌区极端最高气温平均为 36.9 ℃,最高为 41.0 ℃(2017 年),最低为 34.1 ℃(1979 年和 1989 年);中部干旱带极端最高气温平均为 37.7 ℃,最高为 39.0 ℃(2000 年),最低为 33.7 ℃(1979 年)。

从逐年变化来看,引黄灌区和中部干旱带极端最高气温均呈上升趋势。1961 年以来,引黄灌区极端最高气温增幅为 0.48 ℃/10 a,1999 年后明显增加,2008 年后这种增加趋势通过了 α=0.05 显著性检验;根据 UF 和 UB 曲线交点的位置,确定引黄灌区极端最高气温在 2004 年发生突变,突变后增幅变为 0.61 ℃/10 a。1961 年以来,中部干旱带极端最高气温增幅为 0.21 ℃/10 a,于 1999、2000 和 2014 年均发生突变。

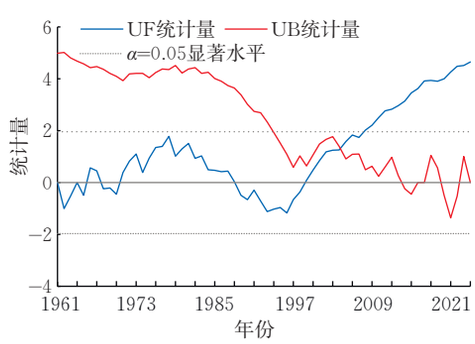
3.3 高温天气周期变化特征

3.3.1 *高温日数* 图 6 为宁夏高温日数小波系数实部等值线和小波方差。由图 6 可知:1961—2024 年引黄灌区高温日数存在 6~12 和 60 a 左右的周期变化,方差图中最大峰值对应 60 a 的时间尺度,表明该尺度的振荡最强,为第一主周期;中部干旱带存在 4~6、24、60 a 左右的周期变化,方差图中对应着 3 个峰值也较为明显,其中 60 a 左右振荡亦最强,为第一主周期。

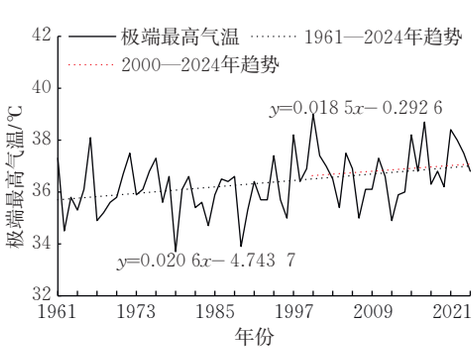
3.3.2 *极端最高气温* 图 7 为宁夏极端最高气温小波系数实部等值线和小波方差。由图 7 可知:1961—2024 年引黄灌区极端最高气温存在 3~5、24、60 a 左右的周期变化,其中,在 3~5 a 尺度上出现了 4 次“多-少”交替的准振荡,且在整个时段较为稳定,具有全域性;方差图呈现 2 个较明显峰值,最大峰值对应 60 a 左右,为第一主周期。中部干旱带存在 3、6、24、60 a 的周期变化,方差图呈现 4 个较明显峰值,最大峰值对应 24 a 的时间尺度,为第一主周期。



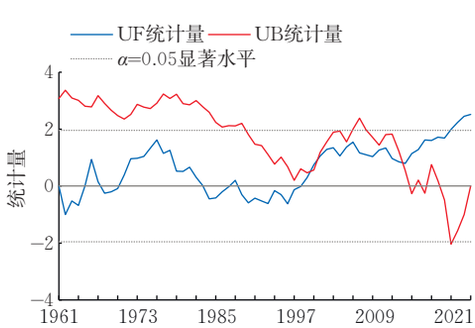
a 引黄灌区极端最高气温年际变化



b 引黄灌区极端最高气温M-K检验



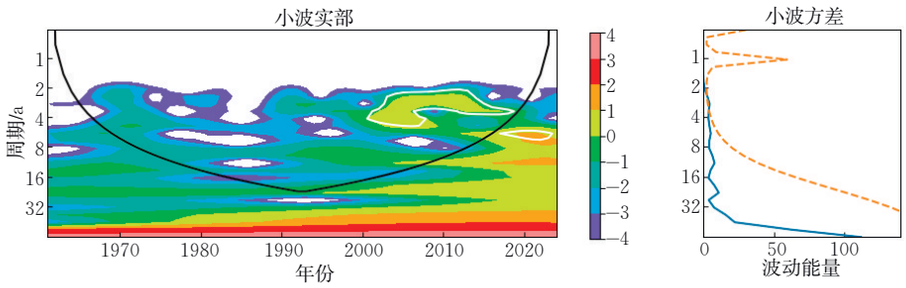
c 中部干旱带极端最高气温年际变化



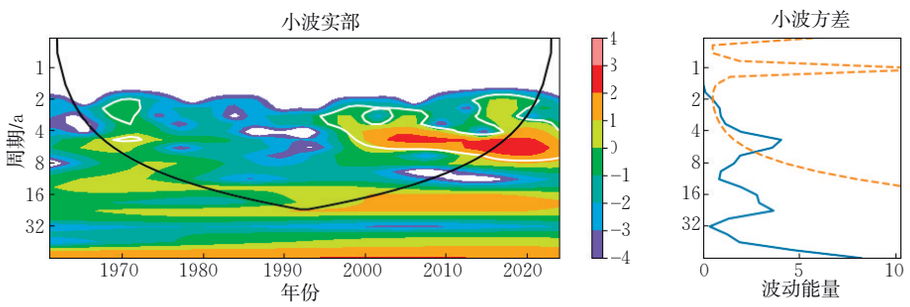
d 中部干旱带极端最高气温M-K检验

图 5 1961—2024 年宁夏极端最高气温年际变化及 M-K 检验

Fig. 5 Interannual variation in the extreme maximum temperature and the M-K test results for Ningxia from 1961 to 2024



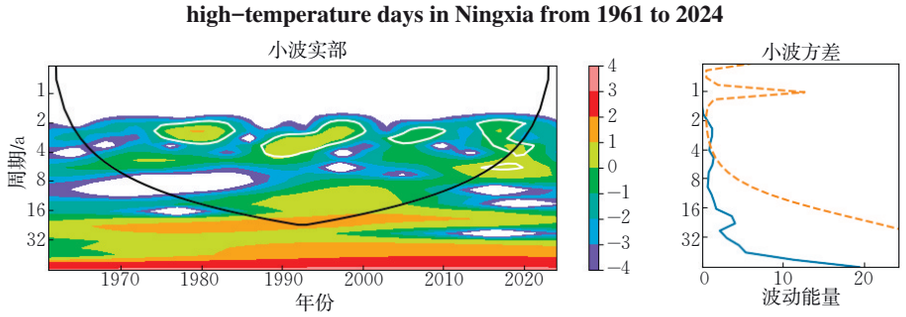
a　引黄灌区



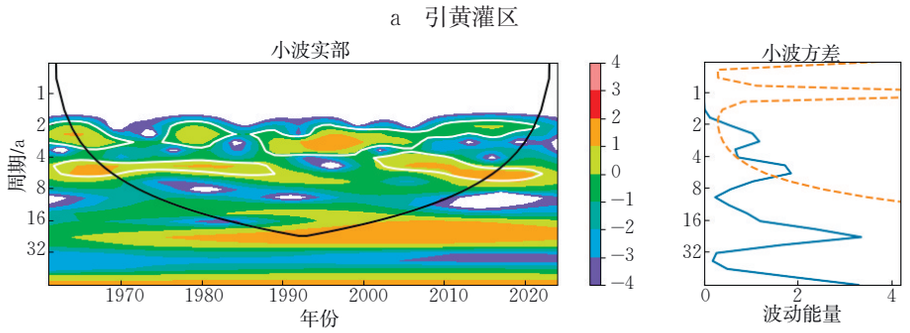
b　中部干旱带

图6　1961—2024年宁夏高温日数小波系数实部等值线和小波方差图

Fig. 6　Contours of the real part of the wavelet coefficients and wavelet variance for the number of high-temperature days in Ningxia from 1961 to 2024



a　引黄灌区



b　中部干旱带

图7　1961—2024年宁夏极端最高气温小波系数实部等值线和小波方差图

Fig. 7　Contours of the real part of the wavelet coefficients and wavelet variance for the extreme maximum temperature in Ningxia from 1961 to 2024

4　结论与讨论

4.1　结论

本文基于1961—2024年宁夏的21个国家气象站逐日最高气温资料,分析了高温天气的时空变化特征,主要得出以下结论。

(1)宁夏高温天气主要出现在引黄灌区和中部干旱带,在气候变暖的大背景下,高温日数增多、强度增强,呈明显的增多增强趋势。

(2)引黄灌区高温日数多年平均为3.0 d,极端最高气温平均为36.9 ℃;中部干旱带高温日数多年平均为1.4 d,极端最高气温平均为37.7 ℃。

(3)1961 年以来,引黄灌区高温日数增幅为 1.23 d/10 a,于 2009 年发生突变,突变后增幅变为 3.26 d/10 a;中部干旱带高温日数增幅为 0.33 d/10 a,于 2014 年发生突变,突变后增幅变为 0.47 d/10 a。1961 年以来,引黄灌区极端最高气温增幅为 0.48 ℃/10 a,中部干旱带为 0.21 ℃/10 a。

(4)引黄灌区和中部干旱带高温日数均存在 60 a 左右为主的振荡周期;引黄灌区极端最高气温存在 60 a 左右为主的振荡周期,中部干旱带则为 24 a 左右为主的振荡周期。

4.2 讨论

全球变暖加剧背景下,高温天气日益频发,易引发水资源紧张与干旱,影响农业生产、粮食安全及生态环境,同时推升电力等能源消耗需求、加剧供应紧张,并危害人体健康。政府部门及社会各界应积极防范应对:一是加强高温监测、预报、预警及影响风险评估技术研究,建设精准化预警发布系统,提升监测预报预警能力;二是通过调整产业结构、加强生态修复与建设、推进技术创新等措施,提升应对高温天气的“气候韧性”;三是推动绿色低碳发展,助力“双碳”目标实现,最大限度减缓气候变暖;四是加大科普宣传力度,提升全社会应对高温天气的意识和能力。

参考文献:

[1] 刘晓琼, 孙曦亮, 刘彦随, 等. 基于REOF-EEMD的西南地区气候变化区域分异特征[J]. 地理研究, 2020, 39(5): 1215-1232.

[2] 王雪琦, 陈进. 影响中国沿海地区青少年气候变化减缓意愿及行为的因子分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(2): 212-222.

[3] 周伟东, 孙国武, 董广涛, 等. 中国东部不同气候带近60年冬季最低气温变化特征及环流分析[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 680-687.

[4] 管煜婷, 张勃, 黄浩. 近58年甘肃气候变化区域差异分析及环流影响[J]. 高原气象, 2022, 41(5): 1291-1301.

[5] 李青春. 大城市夏季高温灾害风险定量评估[C]//中国气象学会. 中国气象学会2007年年会天气预报预警和影响评估技术分会场论文集. 北京: 气象出版社, 2007: 169-176.

[6] 张英娟, 高辉, 丁婷, 等. 基于小时资料的北京高温精细化特征分析[J]. 气象, 2023, 49(9): 1131-1141.

[7] 史桂芬, 朱业玉, 贺付伟, 等. 1961—2020年商丘市高温时空分布特征及其对农作物的影响[J]. 气象与环境科学, 2023, 46(6): 17-23.

[8] 候启, 赵玉洁, 陈小苏. 近60年山东省5—8月高温热浪变化特征分析[J]. 陕西气象, 2024(2): 30-37.

[9] 张君枝, 梁雅楠, 王冀, 等. 气候变化背景下京津冀极端高温事件变化特征研究[J]. 灾害学, 2023, 38(4): 80-88.

[10] 雷正翠, 吴建秋, 蒋薇, 等. 苏南地区高温特征[J]. 气象科技, 2018, 46(1): 155-162.

[11] 张晓东, 赵银鑫, 武丹, 等. 基于遥感的银川市建成区城市扩展及其热环境变化分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1278-1288.

[12] 赵志欣, 霍艾迪, 张丹, 等. 基于遥感的宁夏地区高温热浪风险评估[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 512-521.

[13] 汪庆安. 2010—2015年宁夏气温变化对人群死亡的影响[D]. 银川: 宁夏医科大学, 2018.

[14] 周翠芳, 李晓虹, 程雅茹, 等. 宁夏北部高温气候特征及2017年高温异常分析[J]. 宁夏工程技术, 2018, 17(4): 294-299.

[15] 徐蕊, 李阳, 杨建玲, 等. 1961—2023年宁夏枸杞产区高温的时空演变特征[J]. 应用生态学报, 2025, 36(5): 1440-1448.

[16] 宁夏回族自治区统计局, 国家统计局宁夏调查总队. 宁夏回族自治区2022年国民经济 和社会发展统计公报[EB/OL]. (2023-04-26)[2024-11-09]. https://tj.nx.gov.cn/tjsj_htr/tjgb_htr/202304/t20230426_4046882.html? 1=1&h=0.

[17] 马伟东, 刘峰贵, 周强, 等. 1961—2017年青藏高原极端降水特征分析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(12): 3039-3050.

[18] 李晓虹, 苏占胜, 纳丽, 等. 贺兰山东麓暴雨气候特征及灾害防御对策[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1231-1239.

[19] 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.

[20] 刘永婷, 徐光来, 尹周祥, 等. 全球变化背景下安徽近55 a气温时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2017, 32(4): 680-691.

Characteristics of High-Temperature Weather in Ningxia under a Warming Climate

LI Xiaohong[1,2,3], *YAO Shanshan*[1,2,3*], *ZHAI Yingjia*[1,2,3], *SHANG Yan*[1,2,3]

(1.CMA Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring, Early Warning, and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, Yinchuan 750000, China; 2. Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Yinchuan 750000, China; 3. Ningxia Meteorological Observatory , Yinchuan 750002, China)

Abstract: Daily maximum temperature data from 21 national meteorological stations in Ningxia for the period 1961-2024 were used to analyze the temporal and spatial variations in high-temperature weather using climatic trend analysis, the Mann-Kendall (M-K) test, and wavelet analysis. The results showed that: (1) High-temperature weather in Ningxia occurred mainly in the Yellow River irrigation area and the central arid zone. Both the number of high-temperature days and their intensity exhibited pronounced increasing trends. (2) Since 1961, the number of high-temperature days in the irrigation area has increased at a rate of 1.23 d/10 a. An abrupt change occurred in 2009, after which the rate of increase reached 3.26 d/10 a. In the central arid zone, the number of high-temperature days increased at a rate of 0.33 d/10 a. An abrupt change occurred in 2014, after which the rate of increase reached 0.47 d/10 a. The extreme maximum temperature increased at rates of 0.48 ℃/10 a in the Yellow River irrigation area and 0.21 ℃/10 a in the central arid zone. (3) The number of high temperature days exhibited a dominant oscillation period of about 60 years. The extreme maximum temperature exhibited a dominant oscillation period of about 60 years in the irrigation area and 24 years in the central arid zone.

Keywords: high-temperature days; extreme maximum temperature; Ningxia

(责任编辑　王德平)

《西北工程技术学报(中英文)》"新能源与新材料"特色栏目征稿启事

随着全球新一轮科技革命和产业变革的蓬勃兴起,新能源、新材料以前所未有的速度加快迭代,成为经济社会创新发展的驱动力。为积极响应国家重大战略,聚焦科技前沿,《西北工程技术学报(中英文)》设置了"新能源与新材料"特色栏目,现面向国内外征集相关综述和原创研究论文(要求不涉密、可公开)。

征稿范围(建议但不限于):1.绿氢生产,氢氨化利用,氢能储备运输,储能电站,光电、风电系统,高倍聚光发电系统;2.晶硅光伏电池,新型太阳能电池,锂电池,燃料电池,新型薄膜电池等器件及材料;3.金属材料及合金,先进结构材料,先进功能材料,电子信息材料,人工晶体材料,半导体材料与器件等;4.新能源系统及优化。

投稿方式及格式:请登录网址http://net.nxu.edu.cn,进入《西北工程技术学报(中英文)》主页,点击"在线投稿"进入作者工作中心,按系统要求填写信息,上传稿件时需在题目中注明"新能源与新材料"栏目投稿。论文模板及要求请参见期刊网站首页的"作者中心"。

联系人:王德平　联系电话:0951－2061708