

吴燕良,李柏贞,李浙华,等.近61年来宜春市极端气温事件变化特征及对植被生态环境的影响[J].陕西气象,2025(1):57-65.

文章编号:1006-4354(2025)01-0057-09

近61年来宜春市极端气温事件变化特征及对植被生态环境的影响

吴燕良¹,李柏贞²,李浙华³,钱宏超¹,苏海报³,黄臻¹

(1.宜春市气象局,江西宜春 336000;2.江西省生态气象中心,南昌 330096;

3.上饶市气象局,江西上饶 334000)

摘要:基于1960—2020年宜春市10个气象站点的逐日最高气温、最低气温数据,选取16个极端气温指数,运用线性倾向拟合、反距离加权插值(IDW)、Mann-Kendall(M-K)突变检验等方法揭示宜春市极端气温事件的时空分布和突变特征,使用Hurst指数对极端气温指数的未来变化趋势进行简要分析,并结合Lindeman-Merenda-Gold(LMG)模型,定量计算各个极端气温指数对植被生态环境因子的相对贡献率。结果表明:宜春市极端气温指数表现出明显的不对称性变化,极端冷指数(TN10p、TXn、TNn)的变暖幅度比暖指数(TN90p、TXx、TNx)更大,而昼指数(TX90p、TX10p)的变暖幅度明显小于夜指数(TN90p、TN10p),极端气温指数在空间分布上也有明显差异;M-K突变检验表明除TNam、TN10p、WSDI外,其他13个极端气温指数均发生突变现象,且冷指数发生突变的时间较暖指数更早;Hurst指数分析显示,TN90p和TX90p的H值分别为0.73和0.69,暖夜和暖昼将持续增加,增暖趋势在未来仍会延续;多数暖指数对归一化植被指数(NDVI)和净初级生产力(NPP)的响应相反,而单个冷指数对NDVI和NPP的响应相同,TNam对NDVI和NPP变化的贡献率都超过20%,在所有极端温度指标中,TNam是影响植被生态环境变化最主要的因素。

关键词:极端气温指数;M-K检验;Hurst指数;植被生态环境;贡献率

中图分类号:P467

文献标识码:A

政府间气候变化专门委员会发布的第六次评估报告(AR6)指出,2001—2020年全球平均地表气温相较1850—1900年升高了 $0.99\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。在全球气候变暖的大背景下,极端气候事件发生的频率明显增加,给区域生态系统和人类生产活动造成巨大的破坏^[2-4]。近几十年来,国内外学者对极端气候事件开展了大量研究,其对人类的影响及危害也不断被人们所认识。Dong等^[5]对中国寒区地带的极端气温变化特征研究发现,冷夜和暖

夜的增温幅度大于冷昼和暖昼,大部分地区都出现冷夜和冷昼减少、暖昼和暖夜增加的现象;吴光伟等^[6]对山东省极端气温事件的研究表明,极端气温指数变化速率的空间分布差异较大,极端气温指数变化与海拔高度也有一定的关系;李振中等^[7]对澜沧江上游地区的极端气候研究发现,极端气温的暖昼和暖夜的趋势均呈显著上升,而冷昼和冷夜的趋势均呈显著下降;Zhang等^[8]对云贵高原极端气温的变率研究发现,暖日和冷夜指

收稿日期:2024-02-03

作者简介:吴燕良(1993—),男,汉族,江西抚州人,硕士,工程师,从事气候变化与环境演变研究。

通信作者:李柏贞(1991—),女,汉族,江西吉安人,硕士,高工,从事气候变化及气象灾害风险评估研究。

基金项目:江西省气象科技重点项目(JX2022Z03);宜春市科技局指导性计划项目(宜科字[2023]15号)

数显著增加,南部的极端气温指数变率相对北部更高。

植被系统在固碳和减缓气候变化方面有着重要的作用^[9],极端气温事件对植被动态变化的研究受到大量学者广泛的关注^[10-11],极端气候变化与植被生态环境变迁息息相关^[12]。Auke 等^[13]分析了 2022 年夏季高温对欧洲森林和大气之间碳交换的影响,结果显示,极端高温减少了欧洲森林的碳吸收;Chen 等^[14]在喀斯特地区对极端气温影响 NDVI 的研究发现,暖夜指数的增长率高于暖日指数,NDVI 与酷热天数表现出正相关;任钺潼等^[15]在轿子山保护区极端气温对 NDVI 的响应研究中发现,NDVI 对夜间和白昼气温的响应存在显著差异。以往研究大多集中在较大尺度范围,而极端气温事件在不同尺度上的分布特征也不相同^[16],且极端气温事件的演变规律对小尺度区域植被生态环境的影响也尚不明晰。鉴于此,本文选取宜春市 16 个极端气温指数、NDVI 和 NPP 数据为基础,运用线性倾向拟合、反距离加权插值(IDW)、Mann-Kendall 突变检验、Hurst 指数等方法,揭示了宜春市极端气温事件

的时空分布、突变特征,并对极端气温指数的未来趋势变化进行分析,借助 Lindeman-Merenda-Gold(LMG)模型定量计算各个极端气温指数对植被生态环境因子的相对贡献率,研究结果可为宜春市气象灾害防御、生态文明建设和水土保持等提供科学的参考依据。

1 研究区概况与数据来源

宜春市地处 113°54'E~116°27'E,27°33'N~29°06'N 之间,是赣西北的区域中心城市,境内设有多个自然保护区,多为山地丘陵地貌,地势自西北向东南倾斜,边缘多山环绕^[17]。宜春市属典型的亚热带湿润季风气候,霜冻期短,降水周期长,多年平均气温 16.5~18.1℃,年均降水总量 1 500~1 800 mm,森林覆盖率达 62.7%^[18-19]。

选用来自江西省气象数据中心的宜春市 1960—2020 年 10 个国家气象站逐日最高、最低气温数据。极端气温指数的定义采用世界气象组织“气候变化检测和指数专家组”(ETCCDI)推荐使用的极端气候指标^[20],本研究选取其中 16 个极端气温指数(表 1),并利用 RClimDex1.0 软件^[21]计算指数。植被生态环境数据包括归一化

表 1 极端气温指数说明

分类	代码	指标名称	指数定义	单位
极端 暖指 数	WSDI	暖日持续日数	每年至少连续 6 天最高气温(TX)>90%分位值的日数	d
	SU25	夏日日数	日最高气温(TX)>25℃的日数	d
	TR20	热夜日数	日最低气温(TN)>20℃的日数	d
	TN90p	暖夜日数	日最低气温(TN)大于 1960—2020 年的第 90 个百分位数值日数	d
	TX90p	暖昼日数	日最高气温(TX)大于 1960—2020 年的第 90 个百分位数值日数	d
	TNx	月最低气温极大值	每月内日最低气温的最大值	℃
	TXx	极端最高气温	年内日最高气温的最大值	℃
极端 冷指 数	TN10p	冷夜日数	日最低气温(TN)小于 1960—2020 年的第 10 个百分位数值日数	d
	TX10p	冷昼日数	日最高气温(TX)小于 1960—2020 年的第 10 个百分位数值日数	d
	CSDI	冷日持续日数	每年至少连续 6 天最低气温(TN)<10%分位值的日数	d
	FD0	霜冻日数	日最低气温(TN)<0℃的全部日数	d
	TNn	极端最低气温	年内日最低气温的最小值	℃
	TXn	月最高气温极小值	每月内日最高气温的最小值	℃
其他 指数	DTR	气温日较差	每月日最低气温(TN)与日最高气温(TX)的差值	℃
	TXam	年平均最高气温	年内月最高气温的平均值	℃
	TNam	年平均最低气温	年内月最低气温的平均值	℃

注:TX 为日最高气温,TN 为日最低气温。

植被指数(NDVI)和净初级生产力(NPP)数据,NDVI数据是基于MODIS卫星的月合成的全球归一化植被指数产品,NPP数据是基于NDVI数据并参考钱拴等^[22]的光能利用率模型计算而来。两者的空间分辨率均为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$,时间跨度为2000—2020年。

2 研究方法

采用一元线性回归方程对极端气温指数的变化趋势进行拟合^[23],利用Arcgis10.8软件,采用反距离加权法(IDW)绘制宜春市各极端气温指数变化趋势的空间分布图。利用Mann-Kendall(M-K)突变分析对各指数进行检验^[24-25]。使用

Hurst分析法^[26]对极端气温指数的未来趋势变化进行预测分析,参考前人的研究^[27],其分级标准如表2所示。通过R语言“relaimpo”包中的LMG模型来定量评估极端气温指数对生态环境因子的影响。LMG模型是一种基于最小二乘拟合度量变量重要性的方法。该模型可用于计算每个自变量对因变量的贡献率,借助多元线性回归将NDVI、NPP和各极端气温指数进行标准化处理。基于模型对解释方差的逐步增加来计算每个自变量的贡献,然后将这些贡献标准化,以获得相对贡献率,具体公式详见文献^[28],该模型目前已被广泛应用于气候变化研究领域^[29-30]。

表2 Hurst指数分级表

等级	Hurst指数值域	持续强度	等级	Hurst指数值域	持续强度
1	(0.50,0.55]	很弱	-1	[0.45,0.50)	很弱
2	(0.55,0.65]	较弱	-2	[0.35,0.45)	较弱
3	(0.65,0.75]	较强	-3	[0.25,0.35)	较强
4	(0.75,0.80]	强	-4	[0.20,0.25)	强
5	(0.80,1.00]	很强	-5	(0.00,0.20)	很强

3 结果与分析

3.1 极端气温指数的时空变化

3.1.1 暖指数的时空变化 宜春市近61a极端气温暖指数线性倾向率如表3所示。除WSDI和TXx指标变化趋势不明显外,1960—2020年其他5个暖指数(TX90p、TR20、TN90p、SU25、TNx)

均呈显著上升趋势,通过0.05的显著性检验($P < 0.05$),线性倾向率分别为 $2.00\text{ d}/10\text{ a}$ 、 $2.61\text{ d}/10\text{ a}$ 、 $3.82\text{ d}/10\text{ a}$ 、 $3.16\text{ d}/10\text{ a}$ 和 $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。从各极端暖指数变化趋势的空间分布来看(图1);SU25和TX90p空间变化趋势较一致,变化幅度较大的区域主要位于东部地区,较小的区域

表3 宜春市1960—2020年极端气温指数趋势变化及Hurst指数

极端气温指数	均值	倾向率	趋势	Hurst指数	极端气温指数	均值	倾向率	趋势	Hurst指数
WSDI	5.3	-0.05	↘	0.05	TX10p	20.8	-0.78	↘	0.59
SU25	164.1	3.16 *	↗	0.64	CSDI	3.6	-1.28 *	↘	0.49
TR20	119.8	2.61 *	↗	0.63	FD0	18.9	-3.16 *	↘	0.53
TN90p	20.6	3.82 *	↗	0.73	TNn	-4.5	0.54 *	↗	0.55
TX90p	20.8	2.00 *	↗	0.69	TXn	1.6	0.28 *	↗	0.45
TNx	28.7	0.24 *	↗	0.65	DTR	8.3	-0.13 *	↘	0.53
TXx	38.1	0.05	↗	0.65	TXam	22.4	0.16 *	↗	0.70
TN10p	20.6	-4.04 *	↘	0.72	TNAm	14.1	0.29 *	↗	0.65

注: *表示通过0.05显著性检验;TNx, TXx, TNn, TXn, TXam和TNAm单位为 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,其他指数单位为 $\text{d}/10\text{ a}$ 。

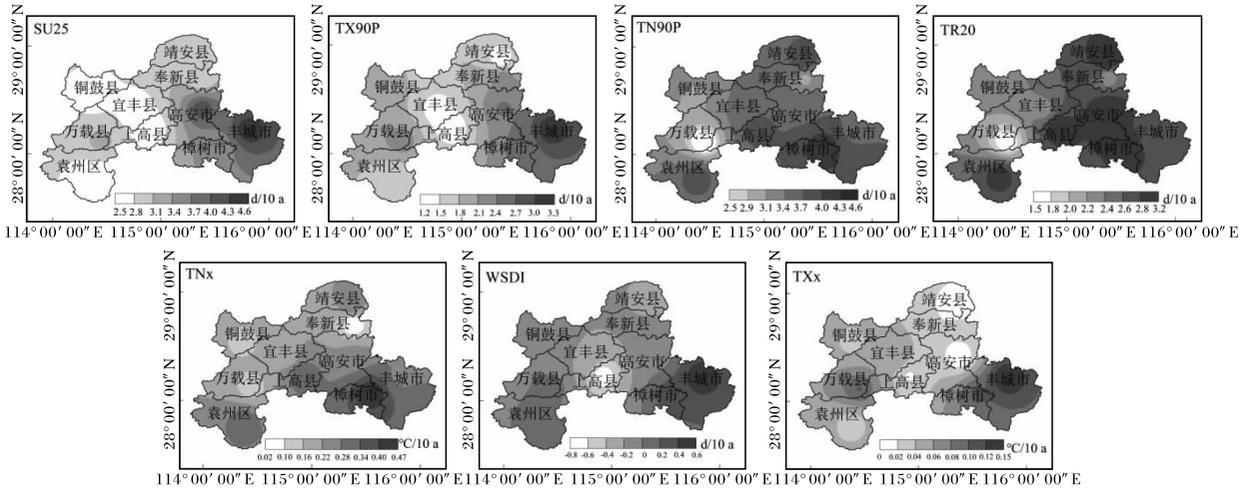


图1 宜春市1960—2020年极端气温暖指数变化趋势分布图(审图号为赣S(2023)39号,下同)

均位于中西部地区,两者所有站点均呈显著上升趋势;但TX90p变化幅度的空间分布差异较大,上升趋势最大的站点达3.26 d/10 a,最小的仅为1.26 d/10 a,而SU25变幅的空间分布差异较小。TN90p、TR20、TNx的空间变化趋势相似,总体上表现为袁州、靖安和东部地区变化幅度较大,而万载、铜鼓、奉新变化幅度较小。TN90p和TR20所有站点线性倾向率都为显著上升趋势,而TNx有90%的站点为显著上升趋势。WSDI变化幅度的空间分布差异较大,变化幅度较大的区域主要在东部地区,较小的区域位于中西部地区,线性倾向率绝对值最小的仅0.02 d/10 a,而最大达0.76 d/10 a,是最小值的38倍。尽管WSDI在宜春地区总体呈下降趋势,但依然有40%的站点呈上升趋势,多位于南部地区。TXx变化幅度的空间分布差异较大,总体上表现为东部地区变化趋势较大,中西部地区变化趋势较小。线性倾向率绝对值最小的仅0.003 d/10 a,而最大达0.15 d/10 a,是最小值的50倍。

3.1.2 冷指数的时空变化 宜春市1960—2020年极端气温冷指数的线性倾向率如表3所示。结果表明,除TX10p指标变化趋势不明显外,1960—2020年其他5个冷指数(FD0、CSDI、TN10p、TXn、TNn)均呈显著变化趋势($P < 0.05$),线性倾向率分别为-3.16 d/10 a、-1.28 d/10 a、-4.04 d/10 a、0.28 °C/10 a和0.54 °C/10 a。从空间分布来看,TN10p和TX10p空间变

化趋势较一致,变化幅度较大的区域主要位于西北部地区,而中东部变化幅度更小,两者所有站点线性倾向率均为下降趋势。其中,所有站点的TN10p和30%站点的TX10p呈显著下降趋势($P < 0.05$)。所有气象站点TXn和TNx均为上升趋势,其中,所有气象站点的TNx和40%的站点的TXn呈显著上升趋势($P < 0.05$),两者均为东部的变化幅度大于西部。FD0和CSDI的空间变化趋势均为万载和东部地区变化幅度最大,中部和北部变化幅度较小,两者在袁州的变化幅度有所差异;且FD0和CSDI均呈显著下降趋势($P < 0.05$)。线性倾向率最大和最小的比值约为1.8倍。FD0和CSDI线性倾向率最小的分别为-2.40 d/10 a和-0.97 d/10 a,而最大的分别达-4.47 d/10 a和-1.72 d/10 a。

3.1.3 年平均最高、最低气温和气温日较差的时空变化 宜春市1960—2020年其他气温指数的线性倾向率如表3所示。从年变化来看,TXam和TNam变化趋势一致,均呈显著上升趋势,而DTR呈显著下降趋势($P < 0.05$)。TXam、TNam和DTR的线性倾向率分别为0.16 °C/10 a、0.29 °C/10 a和-0.13 °C/10 a。在空间分布上,DTR和TXam的空间变化趋势比较一致,均为东部地区变化幅度最大,中西部地区变化幅度更小。DTR整体呈下降趋势,其中有80%的气象站点通过了0.05显著性检验,而TXam是显著上升趋势。TNam整体也呈显著上升趋势,东南部和北部变

化幅度较大,中西部地区变化幅度更小,线性倾向率最小的仅为 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,而最大的达 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,是最小值的 1.67 倍。

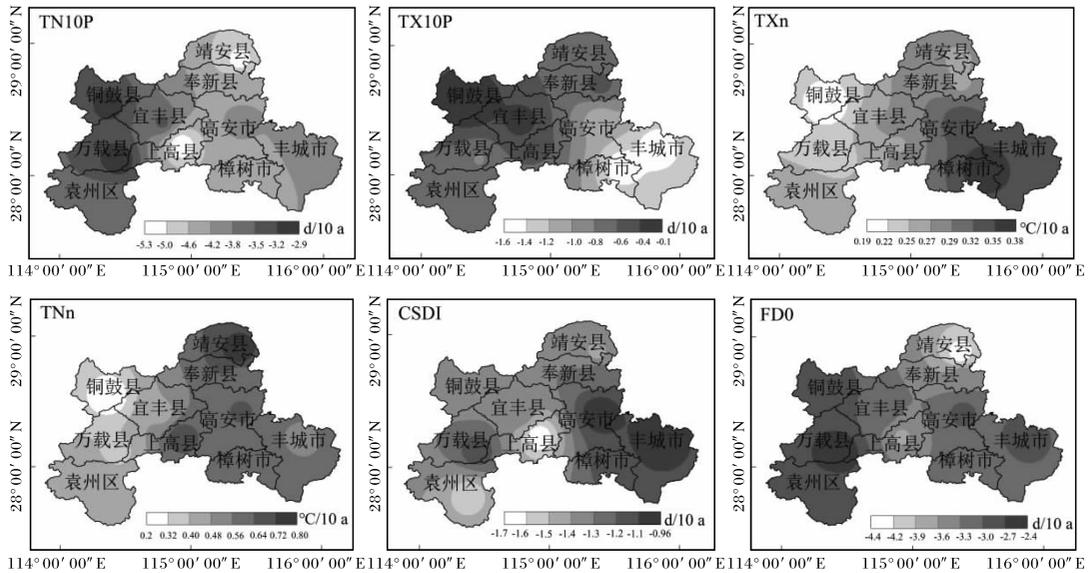


图 2 宜春市 1960—2020 年极端气温冷指数变化趋势的时空分布图

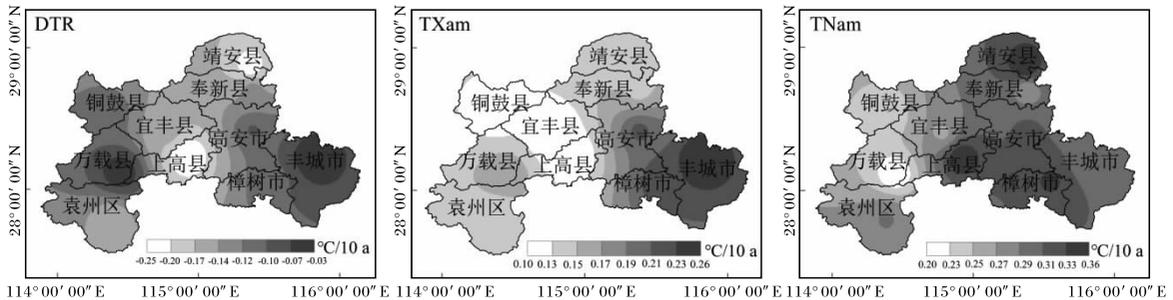


图 3 宜春市 1960—2020 年气温日较差(DTR)、年平均最高气温(TXam)和年平均最低气温(TNam)变化趋势的时空变化

3.2 极端气候事件的突变分析

通过 M-K 检验发现,1960—2020 年宜春市的 16 个极端气温指数中除 TNam、TN10p、WSDI 外,其他 13 个极端气温指数均发生了突变(图 4)。其中, TXam 在 1970 年有明显突变,由相对偏冷期转为相对偏暖期($P < 0.05$)。DTR 在 2006 年有明显突变,由相对偏高期转为相对偏低期($P < 0.05$)。极端暖指数 TX90p、TR20、TN90p、SU25、TNx、TXx 分别在 2003、2011、2004、2002、2000 和 1962 年发生突变,由相对偏冷(短)期转为相对偏暖(长)期($P < 0.05$)。极端冷指数 TX10p、FD0、CSDI 分别在 2011、1988 和 1981 年发生突变,由相对偏短期转为相对偏长期

($P < 0.05$)。而 TXn 和 TNn 分别在 1999 和 1983 年发生突变,由相对偏冷期转为相对偏暖期($P < 0.05$)。整体上宜春市的温度变化是由相对偏冷期转变为相对偏暖期,冷指数发生突变时间较暖指数更早。

3.3 未来气候变化趋势预测

根据 Hurst 指数对宜春市近 61 a 来各极端气温指数未来变化趋势进行分析,结果如表 3 所示。可看出,大多数暖指数的 Hurst 值超过 0.5,说明暖指数仍将延续其上升的趋势。其中: TN90p 和 TX90p 的 Hurst 指数分别为 0.73 和 0.69,表明该地区的暖夜和暖昼将持续增加,增暖趋势在未来整体上依然延续; WSDI 的 Hurst 指

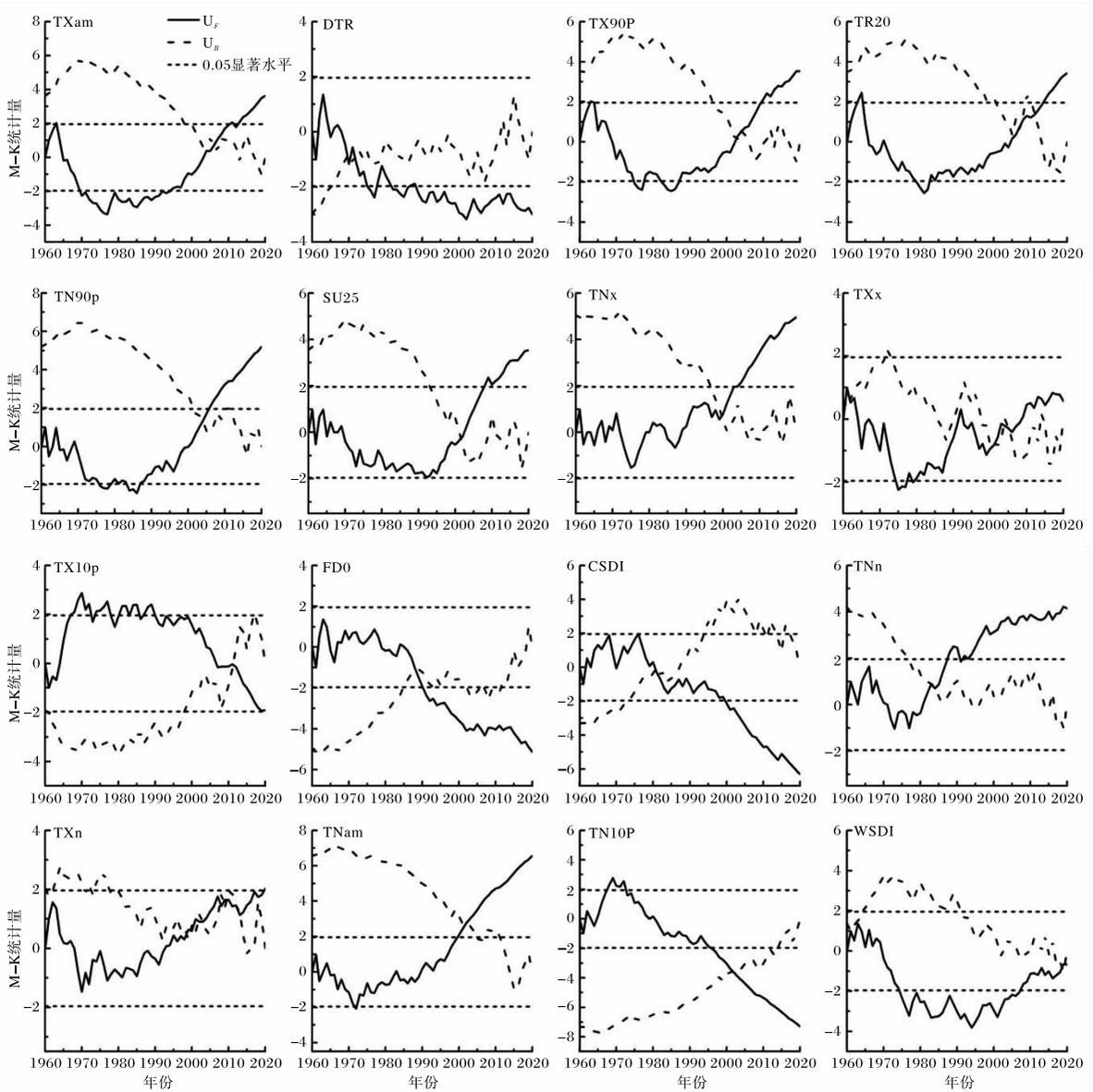


图4 宜春市1960—2020年宜春市极端气温指数的Mann-Kendall检验

数为0.05,具有很强的反持续性,但其线性倾向率未通过显著性检验,表明这种反持续性发生的可能性不高。在冷指数中,TXn的Hurst值小于0.5,表明存在一定的反持续性,即未来可能转变为下降趋势。大多数冷指数的Hurst值超过0.5,表明仍将延续下降的趋势,其中,TN10p的Hurst值高达0.72,表现为较强的持续性,表明冷夜日数将持续减少。CSDI的Hurst值为0.49,存在弱的反持续性,在一定程度上有随机性。从其他指数的Hurst值来看:TXam和TNam的Hurst值分别是0.70和0.65,均表现

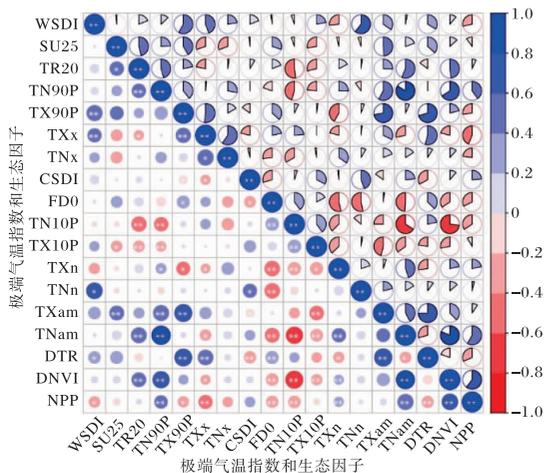
出较好的持续性,表明该区域的未来年最高气温和最低气温变化趋势仍以增加为主;而DTR的Hurst值为0.53,表现出弱的持续性,表明DTR仍将延续其下降的趋势。

3.4 极端气温指数对植被生态环境的影响

以NPP和NDVI作为植被生态环境指标,探讨2000—2020年极端气温事件对植被生态环境变化的影响。基于宜春市16个极端气温指数与NDVI、NPP相关分析图(图5),大多数暖指数与NDVI呈正相关,其中,TR20、TN90p与NDVI的相关系数分别为0.48和0.66($P < 0.01$),TXx

与 NDVI 的相关系数为 $-0.21 (P < 0.05)$ 。在冷指数中, TN10p、TX10p 和 FD0 与 NDVI 的相关系数分别为 $-0.73 (P < 0.01)$ 、 -0.28 和 $-0.34 (P < 0.05)$, CSDI、TNn 和 TXn 与 NDVI 正相关, 只有 TXn 通过了 0.01 的显著性检验。在其他指数中, DTR 与 NDVI 负相关, TXam 和 TNam 与 NDVI 正相关, 相关系数分别为 -0.20 、 0.38 和 $0.81 (P < 0.01)$ 。

大多数暖指数与 NPP 呈负相关, 其中 TXx、TX90P 和 WSDI 相关系数分别为 $-0.44 (P < 0.01)$ 、 -0.27 和 $-0.28 (P < 0.05)$ 。TR20 和 TN90P 与 NPP 正相关, 只有 TN90p 通过 0.01 的显著性检验, 相关系数为 0.40。在冷指数中, TN10p、TX10p 和 FD0 与 NPP 负相关, CSDI、TNn 和 TXn 与 NPP 正相关, 只有 TN10p、FD0 和 TXn 通过 0.01 的显著性检验, 相关系数分别为 -0.34 、 -0.32 和 0.22 。在其他指数中, DTR 与 NPP 负相关, 相关系数为 $-0.32 (P < 0.01)$, TXam 和 TNam 与 NPP 为正相关, 只有 TNam 通过 0.01 的显著性检验, 其相关系数为 0.58。



*和**分别代表通过0.05和0.01的显著性检验; 饼状图面积大小表示相关系数值。

图5 宜春市 2000—2020 年极端气温指数与生态因子的相关分析图

为探讨各极端温度指数对宜春市植被生态环境因子的重要性, 基于 LMG 模型评估极端气温指数对 NDVI 和 NPP 的相对贡献率(图 6)。结果表明, TNam 对 NDVI 变化的贡献率最大, 达到了 21.16%, 其次为 TN10p, 贡献率为

20.21%, TN90p 的贡献率为 12.35%。TR20、TX90p、TXam、DTR 的贡献率也相对较高, 其余极端温度指数对 NDVI 的相对贡献率均不超过 5%。TNam 和 TXam 对 NPP 变化的贡献率最大, 分别为 20.79% 和 10.52%, DTR 和 TN90p 次之, 分别为 9.50% 和 8.78%, TNx 和 TXx 对 NPP 变化的贡献率也不可忽视, 分别达到 7.71% 和 7.24%。其他极端温度指数对 NPP 变化的贡献率均不超过 5%。

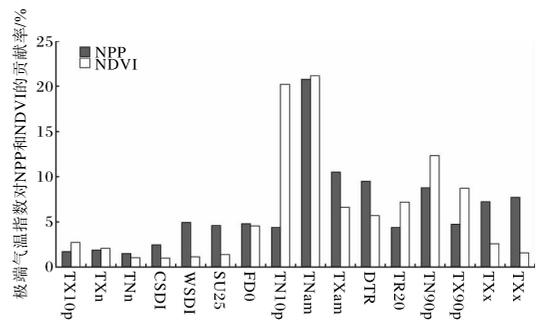


图6 宜春市 2000—2020 年不同极端温度指数对 NPP 和 NDVI 的相对贡献率

4 结论

(1) 61 a 来, 宜春市极端气温暖指数大多呈显著上升趋势, 而冷指数呈显著下降趋势。宜春市年平均最高、最低气温均呈显著升高趋势, 气温日较差表现为显著的下降趋势。空间分布上, 多数暖指数和 3 个其他指数的东部变化幅度较西部更大, 冷指数变化趋势的空间分布差异较大。

(2) 极端气温指数表现出明显的不对称性变化, TNam 的变暖幅度明显小于 TXam 的变暖幅度, 多数极端冷指数(TN10p、TXn、TNn)的变暖幅度比暖指数(TN90p、TXx、TNx)的变暖幅度更大, 而昼指数(TX90p、TX10p)的变暖幅度显著小于夜指数(TN90p、TN10p)。极端气温暖指数仍将延续其上升的趋势, 冷指数仍将延续下降的趋势, 年最高气温和最低气温变化趋势仍以增加为主, 未来宜春市将保持增暖趋势。

(3) 突变分析显示, 指数 TX90p、TN90p、SU25 和 TNx 突变发生的时间在 2000 年以后, FD0、CSDI、TNn 突变发生在 1980—1990 年之间。TXam 的突变发生在 1970 年, TNam、

TN10p、WSDI 等指数没有发生明显的突变。多数极端气温冷指数的突变时间比暖指数发生突变的时间更早。

(4)多数暖指数对 NDVI 和 NPP 的响应是相反的,而单个冷指数对 NDVI 和 NPP 的响应是相同的。TN90p、TXn、TNam 与 NDVI、NPP 均为显著正相关,而 TXx、TN10p、FDO 与 NDVI、NPP 均为显著负相关。TNam 对 NDVI 和 NPP 变化的贡献率均超过 20%,是影响植被正常生长的主要因素。

参考文献:

- [1] 翟盘茂,周佰铨,陈阳,等. 气候变化科学方面的几个最新认知[J]. 气候变化研究进展,2021,17(6): 629-635.
- [2] DING Z Y, PU J, MENG L H, et al. Asymmetric trends of extreme temperature over the Loess Plateau during 1998-2018[J/OL]. International Journal of Climatology, 2021 [2024-01-15]. <https://doi.org/10.1002/joc.6798>.
- [3] 于海敬,葛非凡,王金兰,等. 1980—2019年新乡市极端气温时空变化特征[J]. 陕西气象,2021(4):45-51.
- [4] 王蕾,张百超,石英,等. IPCC AR6 报告关于气候变化影响和风险主要结论的解读[J]. 气候变化研究进展,2022,18(4):389-394.
- [5] DONG Y Y, ZHAI J Q, ZHAO Y, et al. Impacts of large-scale circulation patterns on the temperature extremes in the cold regions of China with global warming[J/OL]. Frontier in Earth Science, 2023 [2024-01-15]. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1120800>.
- [6] 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.
- [7] 李振中,许民,宋轩宇. 基于气象台站的澜沧江上游极端气温与极端降水变化特征研究[J]. 中低纬山地气象,2023,47(1):38-47.
- [8] ZHANG K X, LUO J J, PENG J T, et al. Analysis of extreme temperature variations on the Yunnan-Guizhou Plateau in Southwestern China over the past 60 years[J/OL]. Sustainability, 2022 [2024-01-15]. <https://doi.org/10.3390/su14148291>.
- [9] 徐勇,黄海艳,戴强玉,等. 西南地区陆地植被生态系统 NPP 时空演变及驱动力分析[J]. 环境科学,2023,44(5):2704-2714.
- [10] 曹云,孙应龙,陈紫璇,等. 2000—2020 年黄河流域植被生态质量变化及其对极端气候的响应[J]. 生态学报,2022,42(11):4524-4535.
- [11] CAO Y P, XIE Z Y, HUANG X H, et al. Vegetation dynamics and its trends associated with extreme climate events in the Yellow River Basin, China[J/OL]. Remote Sensing, 2023 [2024-01-15]. <https://doi.org/10.3390/rs15194683>.
- [12] 段荣,杨春艳,李婧,等. 黔西南州极端气温时空演变规律研究[J]. 中低纬山地气象,2021,45(6):44-49.
- [13] WOUDE A M, PETERS W, JOETZJER E, et al. Temperature extremes of 2022 reduced carbon uptake by forests in Europe[J/OL]. Nature Communications, 2023 [2024-01-15]. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41851-0>.
- [14] CHEN Y L, ZHANG Y, ZHANG H, et al. Extreme temperatures affect NDVI in Karst ecological fragile area[J/OL]. Theoretical and Applied Climatology, 2023 [2024-01-15]. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04737-1>.
- [15] 任钊潼,程清平,金韩宇,等. 轿子山国家级自然保护区气候变化特征及对 NDVI 的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(4):168-177.
- [16] GONG X W, WANG X Y, LI Y Q, et al. Observed changes in extreme temperature and precipitation indices on the Qinghai-Tibet Plateau, 1960-2016[J/OL]. Frontiers in Environmental Science, 2022 [2024-01-15]. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.888937>.
- [17] 王帆,黄平,侯董亮,等. 宜春市国家重点保护植物现状及保护对策[J]. 南方林业科学,2023,51(4):41-46.
- [18] 王文军,气候变化条件下宜春地区水稻生长模拟研究[D]. 南昌:南昌大学,2016:18-19.
- [19] 权丽君,赖水牯,吕添贵. 基于 SWOT 分析的宜春市袁州区低丘缓坡开发利用策略探讨[J]. 江西农业学报,2013,25(5):152-155.
- [20] ALEXANDER L V, ZHANG X, PETERSON T C, et al. Global observed changes in daily climate

- extremes of temperature and precipitation[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006[2024-01-15]. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>.
- [21] ZHANG X B, YANG F. Rclimdex(1.0) users manual(EB/OL). (2004-09-10)[2024-02-03]. [https://www.docin.com/p-1888915226.html/RCLimDex\(1.0\)UserManual.pdf](https://www.docin.com/p-1888915226.html/RCLimDex(1.0)UserManual.pdf).
- [22] 钱拴,延昊,吴门新,等. 植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型[J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6573-6583.
- [23] ZHANG L, KARTHIKEYAN R, BAI Z, et al. Spatial and temporal variability of temperature, precipitation, and streamflow in upper Sang-Kan Basin, China [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 31(2): 279-295.
- [24] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [25] KENDALL M G. Rank correlation measures[M]. London: Charles Griffin, 1975: 202.
- [26] HURST E H. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. *Transactions of the American Society of the Civil Engineers*, 1951, 116(1): 770-808.
- [27] 刘宇峰,原志华,孙铂. 近 15 年来西安市主要气候要素变化的 R/S 分析[J]. *西安文理学院学报(自然科学版)*, 2016, 19(1): 73-78.
- [28] GROEMPING U. Relative importance for linear regression in R: The package relaimpo[J]. *Journal of Statistical Software*, 2006, 17(1): 1-27.
- [29] YAO Y T, WANG X H, LI Y, et al. Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the past thirty years[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(1): 184-196.
- [30] 吴路华,王世杰,白晓永,等. 近 60 年来印江河流域极端气候演变及其对净初级生产力和归一化植被指数的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 960-981.