

不同时间尺度下红河流域植被 NDVI 对极端气候的响应

王谦^{1,2}, 关颖慧^{1,2}, 刘玉国³

(1. 北京林业大学水土保持学院云南建水生态站, 北京 100083; 2. 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083; 3. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091)

摘要: [目的] 探究不同时间尺度下红河流域极端气候变化对植被的影响, 对气候变化背景下流域生态系统保护和适应性管理具有重要意义。[方法] 基于 1982—2022 年 NDVI 数据和 38 个气象站点的实测日气象数据, 使用 RClimDex 模型计算 16 个极端气候指数, 并运用趋势分析和相关分析探讨 NDVI 在年、季、月尺度下对极端气候事件的响应特征。[结果] 1) 红河流域 NDVI 年平均值为 0.68, 总体呈显著上升趋势, 变化幅度为 0.035/(10 a) ($p < 0.01$, $R^2 = 0.78$); 空间上呈“南高北低、西高东低”的分布格局。2) 极端高温事件趋多趋强, 极端降水指数中仅连续湿润天数以 0.42 d/10 a 的速率显著下降, 流域整体呈暖干化态势。3) 极端暖指数的增加对植被生长具有显著的促进作用, 极端冷指数的增加对植被生长具有显著的抑制效应, 而 DTR 则表现出短期尺度上对 NDVI 的正向促进作用和长时间尺度下对 NDVI 的反向抑制作用; 大部分极端降水指数与 NDVI 在年尺度上呈显著正相关, 而在季节和月尺度上多表现为负相关。[结论] 不同时间尺度下植被 NDVI 对极端气候指数的响应存在显著差异。总体来看, 气温对植被的动态变化起主导作用, 极端气温对植被 NDVI 变化的贡献率高于极端降水, 而植被对极端降水事件表现出良好的适应性。

关键词: 极端气候; 归一化植被指数(NDVI); 时空变化; 红河流域

中图分类号: Q948.112

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0392-11

Response of Vegetation NDVI to Extreme Climate in the Red River Basin at Different Time Scales

WANG Qian^{1,2}, GUAN Yinghui^{1,2}, LIU Yuguo³

(1. Jianshui Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

3. Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] Studying the impact of extreme climate change on vegetation in the Red River basin at different time scales is of great significance for the protection and adaptive management of watershed ecosystems in the context of climate change. [Methods] Based on NDVI data from 1982 to 2022 and daily meteorological data from 38 weather stations, 16 extreme climate indices were calculated using the RClimDex model. Trend detection and partial correlation analysis were used to investigate the response characteristics of NDVI to extreme climate events at annual, seasonal, and monthly scales. [Results] 1) The annual average NDVI in the Red River basin was 0.68, showing a significant upward trend at a rate of 0.035 per decade ($p < 0.01$, $R^2 = 0.78$). Spatially, NDVI exhibited a distribution pattern of "high in the south, low in the north, and high in the west, low in the east". 2) Extreme high-temperature events increased in both frequency and intensity, while among the extreme precipitation indices, only the consecutive wet days decreased significantly at a rate of 0.42 day per decade, indicating an overall warming and drying trend in the basin. 3) The increase in extreme warm indices significantly

收稿日期: 2024-12-31

修回日期: 2025-02-18

录用日期: 2025-03-01

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-04-21

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2021MA013); 国家自然科学基金项目(42371066)

第一作者: 王谦(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事气候变化与植被恢复研究。E-mail: 15213314013@163.com

通信作者: 关颖慧(1988—), 女, 博士, 副教授, 主要从事气候变化与植被恢复研究。E-mail: gyhdm@bjfu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

promoted vegetation growth, while the increase in extreme cold indices had a significant inhibitory effect on vegetation. The diurnal temperature range (DTR) showed a positive correlation with NDVI at a short-term scale and a negative inhibiting effect on NDVI at a long-term scale. Most extreme precipitation indices were significantly positively correlated with NDVI at the annual scale, while they mostly exhibited negative correlations at the seasonal and monthly scales. [Conclusion] There are significant differences in the response of vegetation NDVI to extreme climate indices across different time scales. Overall, temperature plays a dominant role in the dynamic changes of vegetation, with extreme temperature contributing more significantly to NDVI changes than extreme precipitation, while vegetation exhibits good adaptability to extreme precipitation events.

Keywords: extreme climate; NDVI; spatiotemporal variations; the Red River basin

Received: 2024-12-31

Revised: 2025-02-18

Accepted: 2025-03-01

Online(www.cnki.net): 2025-04-21

植被是陆地生态系统的重要组成部分,其呼吸、光合作用在维持生态系统物质循环和能量流动方面发挥着至关重要的作用^[1]。在气候变化的影响下,植被的群落结构及组成将会改变^[2]。IPCC第五次报告^[3]中指出,气候变化不仅包括平均态的气候变化,还包括极端气候变化。极端气候事件是指在特定地点和特定时间段内,气候变量(如温度、降水量等)的值显著偏离其长期平均值的事件,随着全球气候变化的加剧,极端气候事件的频率和强度显著增加^[4]。相较于平均气候变化,极端气候事件具有突发性、破坏性和不可预测性,对植被生长状况的影响更为显著和深远。这些事件(比如热浪和干旱)不仅导致植物生理和生态过程的急剧变化,还可能引发生态系统结构和功能的长期重组,影响植被覆盖类型结构,从而对生态系统的稳定性产生负面影响^[5]。研究和理解极端气候事件对植被的影响,对于制定有效的气候变化适应和缓解策略、保护生态系统具有重要意义。

归一化植被指数(NDVI)是目前用于监测和评估植被健康状况的主要指标,广泛应用于植被对气候变化的响应研究中^[6]。已有研究^[7-8]表明,极端气候事件对植被NDVI的影响具有显著的时间尺度依赖性。CAI等^[7]研究发现,青藏高原的植被NDVI对气候因子存在滞后效应,依赖于不同生态系统的特性;WU等^[8]研究指出,全球植被对气候变化的响应存在时间滞后,对评估极端事件的影响至关重要。短期内,极端气候事件如干旱、低温冻害等可能导致植被生长受阻和NDVI的快速下降。已有研究^[9]发现,北极植被NDVI在温度异常下的短期响应存在显著差异,具体取决于地表覆盖类型。然而,长期来看,植被可能逐渐适应新的环境条件,或通过生态系统强大的自我修复能力使得NDVI逐步回升或达到新的平衡状态。CAO等^[10]研究发现,黄河流域植被尽管受极端气候事件影响,但NDVI显示出长期回升趋势,反映其适

应机制;LI等^[11]研究显示,青藏高原植被NDVI长期呈现增长趋势,表明其逐渐适应气候变化。张晋霞等^[12]研究发现,气温日较差(DTR)和冷夜指数(TN10p)是影响新疆大部分地区年尺度植被NDVI变化的主要极端气候指标;高滢等^[13]研究发现,NDVI对极端气候的响应具有显著的空间异质性,陕西省北部NDVI的变化主要受极端降水的影响,而南部则对极端气温的响应更加敏感。更有研究^[14]表明,植被对气候变化的响应因季节和月份而异。郑海亮等^[14]研究发现,青藏高NDVI在6月和9月受气温的控制,8月则主要受降水量的影响。这种即时响应的捕捉,对于监测植被的短期变化和恢复能力至关重要。不容忽视的是,时间序列长度和数据分辨率对研究结果的可靠性和解释力具有显著影响。目前,Sentinel-2卫星数据(10、20 m)及MODIS数据(500 m)因其较高的空间分辨率已广泛应用于植被NDVI变化的研究中。然而,此类数据如MODIS数据仅提供2000年以来的植被动态监测,Sentinel-2卫星数据提供2015年之后的植被动态监测,数据集时间跨度有限,难以捕捉到植被的长期变化趋势。相比之下,AVHRR数据集(4~8 km)虽然空间分辨率较低,但却能够揭示植被对极端气候事件的长期影响。目前,基于长时间序列数据不同时间尺度下NDVI对极端气候的响应研究较为缺乏。因此,整合长时间序列数据研究多时间尺度下植被对极端气候事件的响应特征对深入理解植被对极端气候事件的多层次响应特征具有重要意义。

红河是云南省境内最重要的国际河流之一,区域内丰富多样的植被不仅构成全球生物多样性的宝库,更是西南地区生态安全屏障的重要组成部分。鉴于此,本文以红河流域为研究对象,基于1982—2022年NDVI数据集及38个气象站点的实测日气象数据,选取16个极端气候指数,采用多元线性回归、Mann-Kendall趋势分析和Pearson相关分析等方

法,系统揭示不同时间尺度下红河流域 NDVI 和极端气候的响应特征。研究结果可为气候变化背景下流域生态环境保护和适应性管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

红河流域位于云南境内,发源于省内的巍山县,流经中国、老挝、越南 3 个国家,是连接中国和东南亚的重要国际河流,流域总面积约为 $19 \times 10^4 \text{ km}^2$,干流全长 1 281 km,其中云南境内 696 km,占河流总长度的 56%。本文选择的研究区仅包括中国境内的流域范围($22^\circ 23' 06'' \sim 25^\circ 35' 36'' \text{N}$, $100^\circ 05' 07'' \sim 105^\circ 59' 15'' \text{E}$),流域面积约 $7.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域内岭谷交错、地形复杂、垂直落差大,并分布有无量山、哀牢山、大围山国家自然保护区等重要敏感生境及元江干热河谷等特殊地带。红河流域是典型的低纬山系河谷地区,地势从北向南呈阶梯状逐级下降,地形复杂、垂直落差大(海拔从 78 m 上升至 3 254 m)。流域以高原季风气候为主,受印度季风和东亚季风的交互影响,流域气候具有雨热同期、干湿分明的特点,多年平均气温 17.67°C ^[15],年平均降水量 700~1 600 mm。

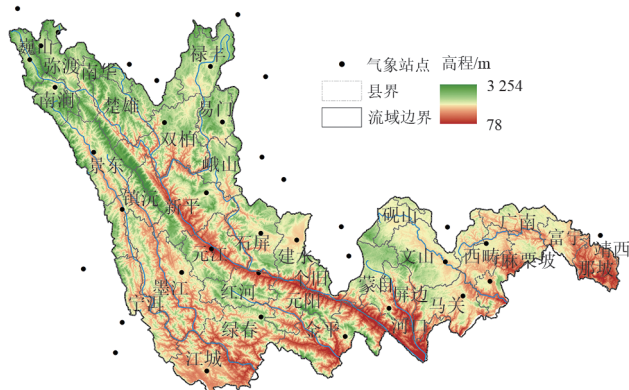


图 1 研究区地理位置和气象站点分布

Fig. 1 Geographical location and distribution of meteorological stations in the research area

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 NDVI 数据 归一化植被指数数据集来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>) 提供的 NOAA CDR AVHRR NDVI 数据产品,时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 5 km,时间跨度 1982—2022 年。使用 R 语言 rgee 包^[16]调用 Google Earth Engine 服务进行月最大值合成和裁剪。徐洋等^[17]验证该数据质量的可靠性,证实该数据集质量良好。为有效降低 NDVI 数据受到云、大气和太阳高度角的影响,本研究采用迭代 SG 滤波分析方法进行数据处理,并通过移动窗口和最小二乘法进行最佳拟合,最终重构红河流域的月 NDVI 最大值合成数据集。在月最大

值 NDVI 数据基础上,构建年、季 NDVI 最大值数据集,以探究该区植被动态及对极端气候的响应。

1.2.2 气象数据 气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn>) 发布的中国地面气候资料日值数据集 (V3.0),包括流域及其周边 38 个气象站点的逐日降水量、日最高气温和日最低气温数据。为使研究结果更加可靠,本研究选取的每个气象站点总体缺失数据不得超过 1%。RClimDex 4.3 自带质量控制模块 (QC),程序规定所有的缺测值都统一设为 NA,数据进行质量控制后进行极端气候指数 (表 1) 的计算,随后用反距离权重法 (IDW) 对 16 个极端气候指数进行空间插值,得到各指数的空间分布。

1.3 研究方法

1.3.1 RClimDex 模型 RClimDex 模型是基于 R 语言开发与维护的一个具有国际认可度的极端气候指数计算工具。该模型可计算 16 个极端气温指数和 11 个极端降水指数,共 27 项 (<https://github.com/ECCC-CDAS/RClimDex>)。这些指标能够较全面、系统地描述和捕捉极端气温和极端降水事件的发生频次、强度和持续时间,并广泛应用到 IPCC 的评估报告及相关研究中。根据研究需要,本研究选取 16 个极端气候指数进行分析,见表 1。

1.3.2 一元线性回归和 Mann-Kendall 趋势检验

1) 一元线性回归

采用一元线性回归方法分析逐个像元对应的 NDVI 的时间序列变化趋势,计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i \text{NDVI}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中:Slope 为 NDVI 回归斜率; n 为研究年限,本文中的 $n=41$; i 为年份; NDVI_i 为第 i 年 NDVI 平均值。

2) Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 检验是一种非参数统计方法,其优势在于无须假定数据服从特定的概率分布,并能够抵御异常观测值的干扰。本研究采用该方法来检验变化趋势的显著性,具体原理见参考文献[18]。

根据一元线性回归分析和显著性检验结果,将 NDVI 变化趋势分为 5 个等级:当 $\text{Slope} > 0$,若 $p < 0.01$,则表示为显著增加;当 $\text{Slope} > 0$,若 $0.01 < p < 0.05$,则表示为较显著增加;当 $\text{Slope} < 0$,若 $p < 0.01$,则表示为显著减少;当 $\text{Slope} < 0$,若 $0.01 < p < 0.05$,则表示为较显著减少;当 $p > 0.05$ 时,则表示无显著变化。

1.3.3 相关分析 本文采用相关系数分析极端气候

表 1 选取的极端气候指数

Table 1 Extreme climate indices selected for the study

类别	简称	名称	定义	单位
极端气温指数	TXx	日最高气温的最大值	日最高气温的年最大值	℃
	TNx	日最低气温的最大值	日最低气温的年最大值	℃
	TXn	日最高气温的最小值	日最高气温的年最小值	℃
	TNn	日最低气温的最小值	日最低气温的年最小值	℃
	TX10p	冷昼日数	日最高气温<10%分位值的日数	d
	TX90p	暖昼日数	日最高气温>90%分位值的日数	d
	TN10p	冷夜日数	日最低气温<10%分位值的日数	d
	TN90p	暖夜日数	日最低气温>90%分位值的日数	d
	DTR	气温日较差	日最高气温与最低气温差的平均值	℃
极端降水指数	R99p	极端强降水量	大于基准期内 99%分位点的日降水量总和	mm
	RX1day	1 d 最大降水量	年最大日降水量	mm
	RX5day	5 d 最大降水量	年最大连续 5 d 降水量	mm
	CWD	连续湿润天数	最长连续降水日数	d
	CDD	连续干旱天数	最长连续无降水日数	d
	R20mm	大雨日数	日降水量≥20 mm 的天数	d
	R25mm	暴雨日数	日降水量≥25 mm 的天数	d

指数与 NDVI 之间的相关关系,以表达极端气候事件对植被的影响^[19]。计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(x_i - \bar{x} \right) \left(y_i - \bar{y} \right) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \bar{x} \right)^2 \sum_{i=1}^n \left(y_i - \bar{y} \right)^2}} \quad (2)$$

式中: $r_{x,y}$ 为 x 与 y 的相关系数; n 为时间长度; i,j 为时间; x_i 为第 i 年的 NDVI 值; $\bar{x}$ 为多年 NDVI 平均值; y_i 为第 i 年极端气候的指数值; $\bar{y}$ 为多年极端气候指数的平均值。其中,相关系数 $r_{x,y}$ 的取值为 $[-1,1]$, $|r_{x,y}|$ 越大,表明变量之间的相关程度越强。

1.3.4 多元线性逐步回归分析 本研究采用最大最小值标准化方法对 NDVI 数据进行归一化处理。具体公式为:

$$Y_{\text{norm}} = \frac{Y - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad (3)$$

式中: Y 为原始数据; $Y_{\min}$ 、 $Y_{\max}$ 分别为原始数据集中的最小值和最大值; Y_{norm} 为标准化后的数据。

采用多元线性逐步回归法量化极端气候对 NDVI 的贡献率。

$$Y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n + \mu_i \quad (4)$$

式中: Y_i 为标准化 NDVI 值; $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为标准化极端气候指数; b_0 为截距项, $b_1, b_2, \cdots, b_n$ 为标准化回归系数; μ_i 为误差项; n 为极端气候指数的个数。如果标准化回归系数为正值,则说明极端气候指数能够促进 NDVI 增加;反之,则抑制 NDVI 增加。

相对贡献率公式为:

$$\text{rcp}_i = \frac{|b_i|}{|b_1| + |b_2| + |b_3| + \cdots + |b_n|} \quad (5)$$

式中: rcp_i 为敏感指数的相对贡献率; b 为标准化回归系数的平均值; i 为敏感指数; n 为候选指数的总个数。相对贡献率越大,表明极端气候指数对 NDVI 的影响越大。

2 结果与分析

2.1 NDVI 时空演变特征

从图 2 可以看出,1982—2022 年红河流域 NDVI 总体处于较高水平,年平均 NDVI 值为 0.68, NDVI 增加速率为 0.035/10 a ($p < 0.01$, $R^2 = 0.78$), 总体呈现出显著上升的趋势。其中,单一年份年均 NDVI 最高值出现在 2022 年,为 0.78;最低值出现在 1982 年,为 0.57。

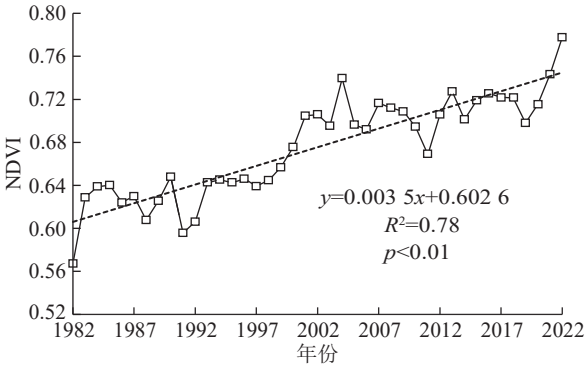


图 2 1982—2022 年红河流域 NDVI 年际变化

Fig. 2 Analysis of NDVI interannual changes in the Red River basin from 1982 to 2020

红河流域 NDVI 空间分布整体呈现“南高北低、西高东低”的格局(图 3a)。高值区集中分布于流域西南部的无量山、哀牢山国家级自然保护区,该区域以大面积常绿阔叶林和草丛为主;低值区主要位于流域北部,受高海拔、陡坡地形及历史时期水土流失的叠加影响,植被覆盖度相对较低。NDVI 的变化趋势(图 3b)表明,显著增加(44.35%)和较显著增加(10.88%)的像元主要分布于北部及中部低 NDVI 区

域,而显著减少(1.83%)和较显著减少(1.91%)的像元零星散布于西南部自然保护区边缘及中部局部地区。值得注意的是,西南部 NDVI 较高,但因接近自然植被生长的生态阈值,其 NDVI 增幅空间有限,变化趋势以稳定为主;相反,流域北部 NDVI 本底值虽较低,但通过退耕还林、石漠化治理等生态工程的持续实施,植被 NDVI 显著提升,具有明显的生态恢复潜力。

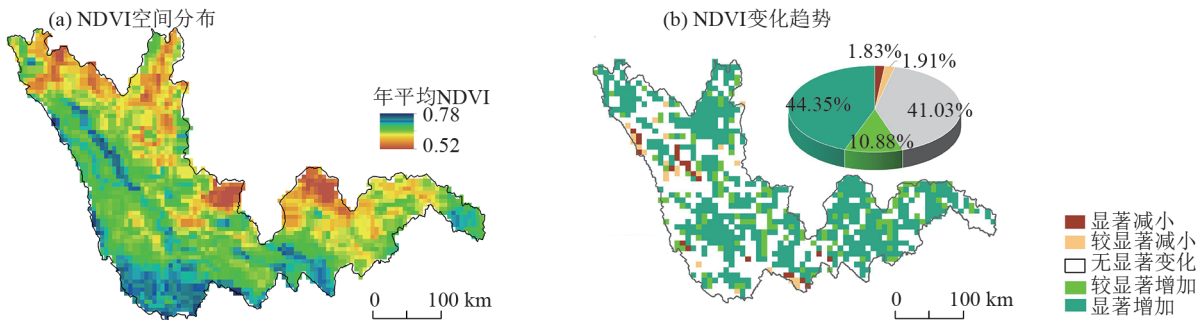


图 3 年平均 NDVI 空间分布及变化趋势

Fig. 3 Spatial distribution of annual average NDVI and the variation trends

2.2 极端气候指数时空变化特征

2.2.1 极端气候指数时间变化特征 从表 2 可以看出,极值指标中日最高气温的最大值(TX_x)、日最低气温的最大值(TN_x)和日最低气温的最小值(TN_n)分别以 0.35、0.30、0.28 °C/(10 a) 的速率显著上升,这种趋势可能引发更频繁和更极端的暖事件发生。相比之下,日最高气温的最小值(TX_n)出现轻微的降温现象,其降温速率为 0.09 °C/(10 a),进一步揭示相对白天夜晚温度更为显著的增温效应。

红河流域冷昼日数、冷夜日数(TX_{10p}、TN_{10p})均呈现显著下降趋势,变化幅度分别为 1.06、1.57 d/(10 a);暖昼日数、暖夜日数(TX_{90p}、TN_{90p})则表现为持续上升趋势,变化幅度分别为 4.10、3.97 d/(10 a),可见极端暖指数表现出比极端冷指数更明显的升温幅度。降水指标中,极端强降水量(R_{99p})和连续干旱天数(CDD)均呈上升趋势,1 d 最大降水量(RX_{1day})、5 d 最大降水量(RX_{5day})、连续湿润天数(CWD)、大雨日数(R_{20mm})、暴雨日数(R_{25mm})呈下降趋势,尽管这些指标未达到显著水平,但反映出红河流域极端降水事件的不均衡分布。

所有降水指标中,仅连续湿润天数呈现显著下降趋势,变化幅度为 0.42 d/(10 a)。总体而言,1982—2022 年红河流域极端气候事件变化显著,气候变化朝着更温暖、干旱的方向发展,同时伴随着降水模式的潜在变化。

表 2 1982—2022 年红河流域极端事件时间变化趋势

Table 2 The variation trends of extreme temperature events in the Red River basin from 1982 to 2022

指标	代码	MK 趋势检验			变化幅度
		Z _{MK}	趋势	显著性	
日最高气温的最大值	TX _x	2.12	↑	*	0.35 °C/10 a
日最低气温的最大值	TN _x	3.23	↑	**	0.30 °C/10 a
日最高气温的最小值	TX _n	-0.06	↓		0.09 °C/10 a
日最低气温的最小值	TN _n	2.18	↑	*	0.28 °C/10 a
冷昼日数	TX _{10p}	-2.31	↓	*	1.06 d/10 a
暖昼日数	TX _{90p}	4.77	↑	**	4.10 d/10 a
冷夜日数	TN _{10p}	-3.08	↓	**	1.57 d/10 a
暖夜日数	TN _{90p}	5.28	↑	**	3.97 d/10 a
气温日较差	DTR	0.44	↑		0.02 °C/10 a
极端强降水量	R _{99p}	0.09	↑		1.07 mm/10 a
1 d 最大降水量	RX _{1day}	-0.33	↓		0.17 mm/10 a
5 d 最大降水量	RX _{5day}	-0.39	↓		2.50 mm/10 a
连续湿润天数	CWD	-1.96	↓	*	0.42 d/10 a
连续干旱天数	CDD	1.11	↑		0.41 d/10 a
大雨日数	R _{20mm}	-0.87	↓		0.17 d/10 a
暴雨日数	R _{25mm}	-0.24	↓		0.11 d/10 a

注: ↑表示上升趋势; ↓表示下降趋势; **为显著性水平 α=0.01; *为显著性水平 α=0.05。

2.2.2 极端气候指数空间变化特征 从空间上看,红河流域的极端温度指标普遍显示出升温倾向(图 4)。具体而言, TX_x 中 45.9% 的站点通过 95% 的显著性检验; TN_x 有 54.1% 的站点显示为显著上升趋势。然而, TN_n 和 TX_n 的上升趋势较弱, 分别只有

37.8% 和 0% 的站点通过显著性检验。TX90p 和 TN90p 的变化趋势尤其显著, 分别有 91.9% 和 86.5% 的站点通过显著性检验, 表明极端暖事件趋多趋强, 尤其是流域西部地区。TX10p、TN10p 和 DTR 呈显著下降的站点分别占 56.8%、2.7% 和 37.8%, 这些下降趋势在流域中部北部和西部最为明显。从图 5 可以看出, 大部分极端降水指数在各站点的变化趋势并不显著, 仅有不到 20% 的站点通过 95%

显著性检验, 这些站点主要集中在流域的东北部和中部部分地区。可见, 不同极端气候指数的变化趋势空间差异性较大, 增减幅度也不同, 体现气候变化的复杂性和区域性特征。气候系统本身具有高度的复杂性和非线性特征, 不同地区的地理位置、气候类型和生态系统特征使得它们在应对气候变化时表现各异, 导致不同区域对气候变化的响应不一致。

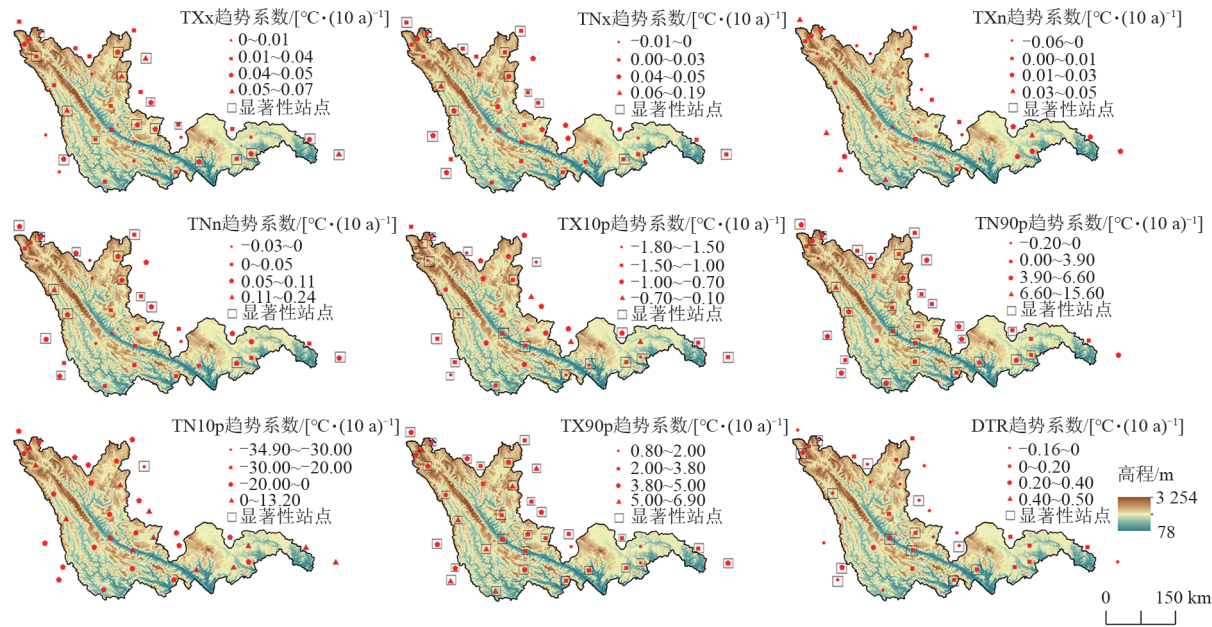


图 4 极端温度指数空间变化趋势

Fig. 4 Spatial variation trends of extreme temperature indices

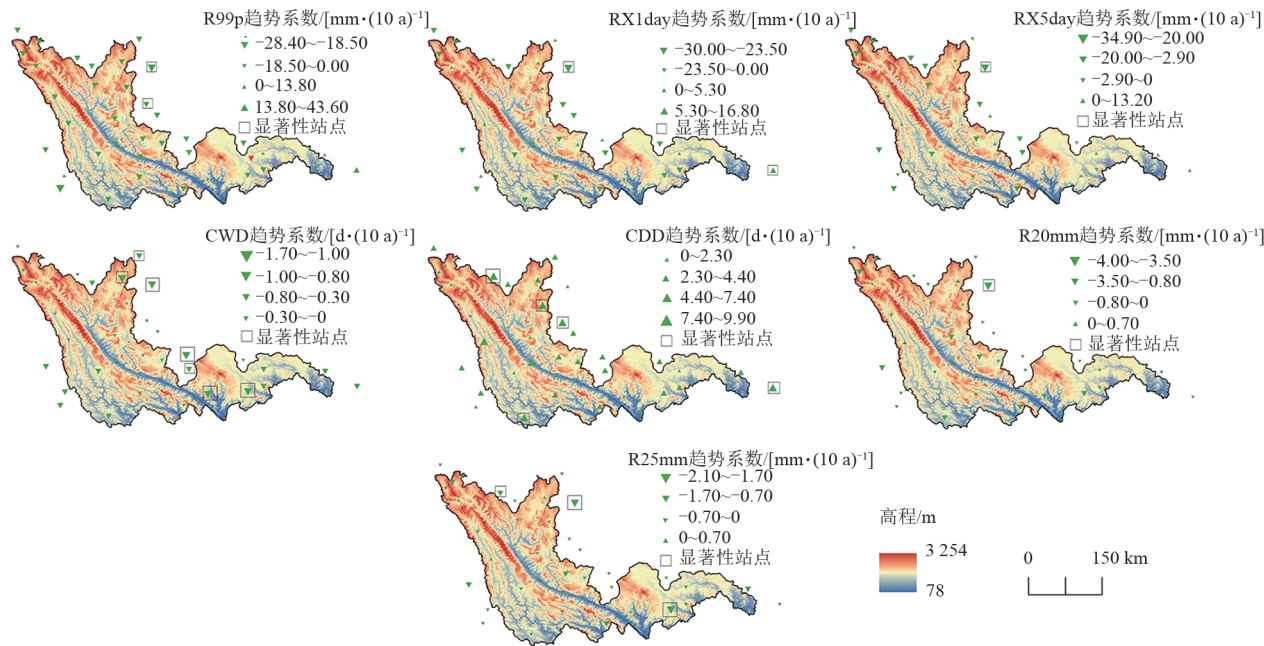


图 5 极端降水指数空间变化趋势

Fig. 5 Spatial variation trends of extreme precipitation indices

2.3 红河流域 NDVI 对极端气候指数的响应

2.3.1 年 NDVI 与极端气候的相关性 由表 3 可知, 在年尺度上, NDVI 与极端气候指数之间呈现较强的

相关性。在 9 个极端气温指数中, 除 TXx 和 TNx 未通过 95% 的显著性检验外, 其余极端气温指数均与 NDVI 显著相关 ($p < 0.05$)。具体而言, NDVI 与表征

极端暖事件的指数(TXn、TX90p 和 TN90p)呈显著正相关,相关系数分别为 0.109、0.241 和 0.199,表明极端暖事件的增加对植被生长具有显著的促进作用;而与表征极端冷事件的指数(TX10p、TN10p 和 DTR)呈显著负相关,相关系数分别为-0.161、-0.245 和-0.085,说明冷事件的增加对植被生长具有显著的抑制效应。在 7 个极端降水指数中,除 CDD 外,

NDVI 与其余极端降水指数均呈显著正相关。其中,大雨日数(R20mm)和暴雨日数(R25mm)与 NDVI 的相关性最为显著,相关系数分别为 0.326($p<0.01$)和 0.323($p<0.01$)。表明连续多日的强降水事件对植被生长具有显著影响,植被能够在频繁或强烈的降水事件中有效利用水分,从而促进植被 NDVI 的增加,植被对极端降水事件表现出良好的适应性。

表 3 年 NDVI 与极端气候指数的相关性

Table 3 Correlations between annual NDVI and extreme climate indices								
指标	TXx	TNx	TXn	TNn	TX10p	TX90p	TN10p	TN90p
年 NDVI	0.019	-0.014	0.109**	0.190**	-0.161**	0.241**	-0.245**	0.199**
指标	DTR	R99p	RX1day	RX5day	CWD	CDD	R20mm	R25mm
年 NDVI	-0.085*	0.118**	0.203**	0.240**	0.240**	0.016	0.326**	0.323**

注:*表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$ 。

为深入探究红河流域年 NDVI 与极端气候指数之间的空间相关性,本研究选择与极端气候指数显著关联的 6 个极端温度指数和 6 个极端降水指数进行进一步分析。图 6 为年 NDVI 对极端气温指数的响应程度,各项通过的显著性检验均在 $\alpha=0.05$ 水平。结果表明,NDVI 与 TXn 显著正相关的区域主要位于流域东南部,而与 TNn 显著正相关的区域集中于流域西北部。极端暖事件指数 TX90p 和 TN90p

在流域大部分区域呈正相关,正相关的面积比例分别达到 99.25% 和 99.51%,尤其在流域西部的相关性更强。极端冷事件指数 TN10p 和 TX10p 与 NDVI 呈负相关的区域分别集中于流域北部和东南部。NDVI 在流域中部和北部地区与 R99p、RX1day、RX5day 和 R20mm 均呈显著正相关($p<0.05$),其正相关的面积比例分别为 65.15%、61.41%、40.86%、60.37%(图 7)。

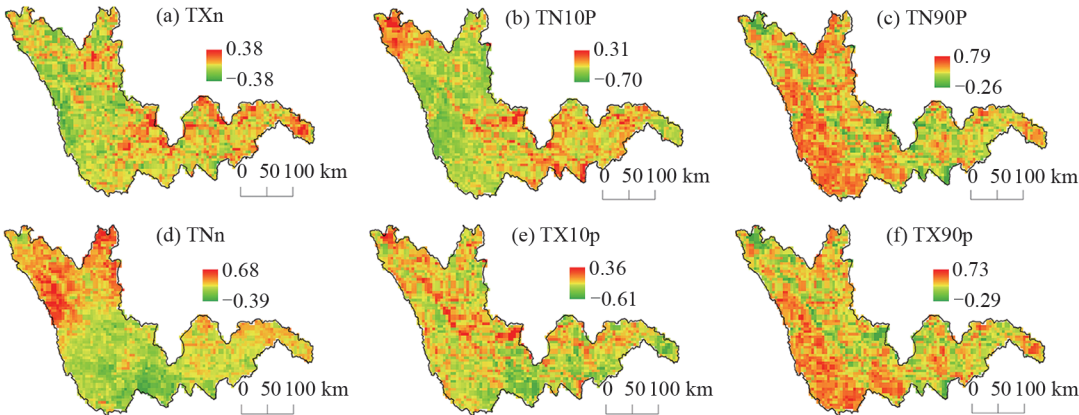


图 6 年 NDVI 与极端气温指数的相关性

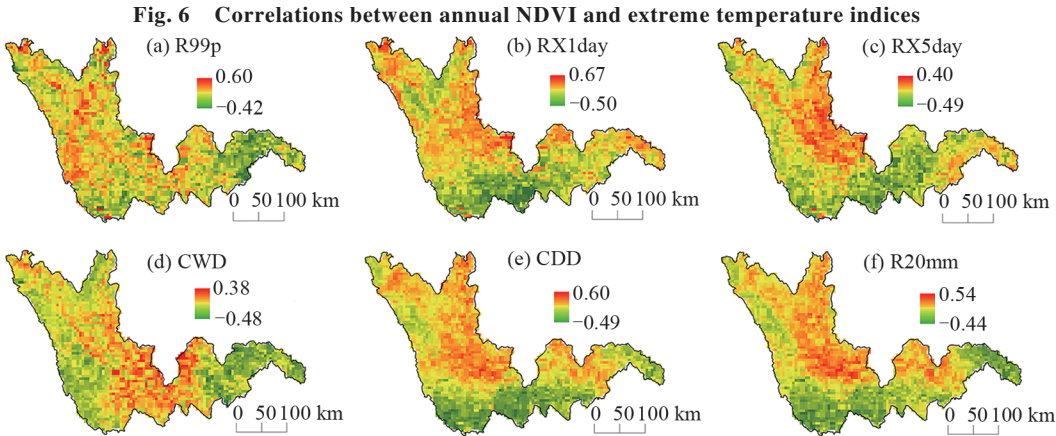
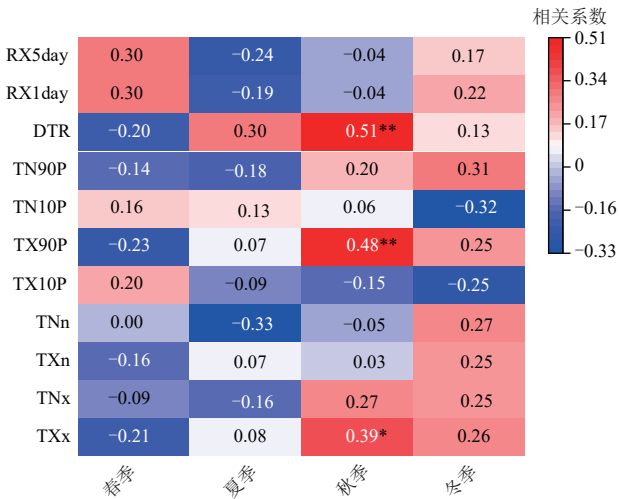


图 7 年 NDVI 与极端降水指数的相关性

Fig. 7 Correlations between annual NDVI and extreme precipitation indices
<http://stbxb.alljournal.com.cn>

2.3.2 季节 NDVI 与极端气候的相关性 由图 8 可知,红河流域在季节尺度上 NDVI 与极端气候指数的相关性不高。主要是由于 NDVI 与气候因素之间存在时间滞后,季节尺度可能无法捕捉植被与气候间的细微变化。春季中有 6 个极端气温指数与 NDVI 呈负相关,其中多数为表征极端暖事件指数(如 TXx、TNx、TX90p 和 TN90p)。夏季有 5 个指数与 NDVI 呈负相关,主要表现在极端冷事件指数。秋季有 7 个指数与 NDVI 呈正相关,其中表征极端暖事件的指数 TXx、TX90p 和 DTR 与 NDVI 显著正相关,以 DTR 的相关性最大,达到 0.51。冬季,除 TN10P 和 TX10P 2 个冷事件指数外,其余极端气候指数均与 NDVI 呈正相关。表明植被在不同生长季节对气候变化的敏感性各异。



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$ 。下同。

图 8 季节 NDVI 与极端气候指数的相关性

Fig. 8 Correlations between seasonal NDVI and extreme climate indices

2.3.3 月 NDVI 与极端气候的相关性 由图 9 可知,月尺度上 NDVI 对极端气候指数的响应更加复杂,其中 1、2 月的 NDVI 与 TXx、TNx、TXn、TNn、TX90p 和 TN90p 呈显著正相关。随着月份的推移,这种相关性逐渐减弱,某些月份甚至出现负相关。进一步分析发现,NDVI 与极端暖事件(如 TX90p 和 TN90p)在 11 月的相关性较高,而在 9—12 月则相对较低。11 月,植物进入生长周期的结束阶段,此时植被的生长受气温和水分等环境因素的影响相比其他时间可能更为显著。值得注意的是,NDVI 与 DTR 在大部分月份均呈显著正相关,尤其是 1—2、6—10 月。在极端降水指数中,NDVI 与 RX1day、RX5day 大部分呈负相关但不显著,相关性较低。

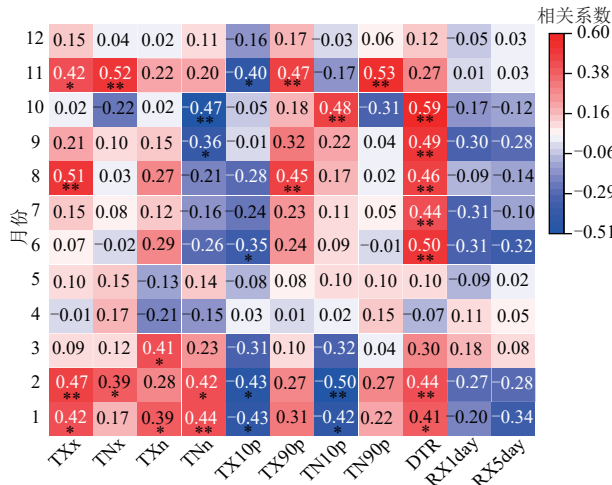


图 9 月 NDVI 与极端气候指数的相关性

Fig. 9 Correlations between monthly NDVI and extreme climate indices

2.4 极端气候对 NDVI 的影响

为进一步揭示极端气候指数对红河流域 NDVI 的影响,利用多元逐步回归法从 9 个极端气温指数和 7 个极端降水指数中筛选出对 NDVI 具有显著影响的自变量,经过模型识别,最终剩下 7 个极端气温指数和 3 个极端降水指数进行相对贡献率分析。结果表明,回归系数为正值 CWD、R20mm、R25mm、TN10p、TNn、TX90p、TXn 和 TXx 显著促进 NDVI 的增加,相对贡献率分别为 4.46%、18.93%、5.19%、3.54%、7.67%、5.56%、5.33% 和 22.61%,其中 TXx 对 NDVI 的相对贡献率最大。在对 NDVI 负向影响中,DTR 和 TNx 相对贡献率分别为 10.85%、15.85%。极端气温指数的总贡献(71.42%)高于极端降水指数(25.58%)表明气温对植被动态变化的主导作用。

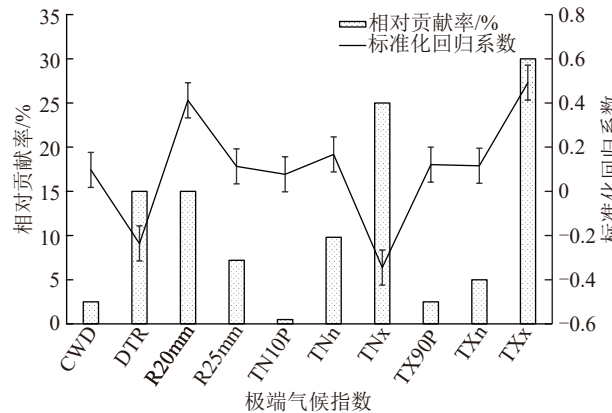


图 10 极端气候指数相对贡献率与 NDVI 的标准化回归系数

Fig. 10 Relative contribution rates of extreme climate indices and standardized regression coefficients for NDVI

3 讨论

3.1 与以往研究的对比

通过对红河流域多年 NDVI 变化的研究发现,植

被整体呈显著上升趋势,与现有研究^[20-21]结果一致。在极端气候指数变化中,暖指数呈上升趋势,冷指数呈下降趋势。红河流域暖指数高值区主要分布在哀牢山以西地区,与 ZHANG 等^[22]研究结果一致,这一地区的特殊地形和水热条件可能进一步加强温度对植被生长的促进作用。对比极端气候对 NDVI 的影响发现,温度是影响红河流域植被生长的主要因素。本研究表明,极端暖事件促进红河流域植被的增加。具体来说, TN10p、TNn、TX90p、TXn 和 TXx 显著促进 NDVI 的增加,而 DTR 和 TNx 则显著抑制 NDVI 的增加,这种影响的差异可能与昼夜温差的变化有关,昼夜温差较大可能导致植物在夜间的生长受限。流域中北部区域 NDVI 与极端降水指标 (R99p、RX1day、RX5day、R20mm) 呈显著正相关 (图 7) ($p < 0.05$),可能是由于该区域受历史干旱事件的影响^[23],极端降水的增加在一定程度上缓解水分胁迫,补偿水分亏缺,从而促进植被生长,降水的空间分布和水源可获得性在该过程中也起到调节作用。在中国南部等水分充足地区,极端温度指数对植被的影响比极端降水更为显著^[24]。当降水已满足植被正常需求时,极端降水的增加对植被生长的促进作用不明显,此时极端温度变化对植被的影响更为重要,与水分和温度之间的相互作用有关,温度变化影响植物的水分利用效率。总体来看,极端高温对于红河流域植被生长起到促进作用,极端低温则相反,极端降水的作用有限。

3.2 植被 NDVI 对极端气候响应的尺度效应

本研究发现,不同时间尺度上 NDVI 对极端气候指标的响应存在显著差异。在季节和月尺度下,气温日较差 DTR 与 NDVI 的相关性最强,多数呈正相关,但在年尺度上, DTR 与 NDVI 却呈显著负相关。一般情况下,较大的 DTR 意味着白天温度高、光合作用强,夜间温度低则有助于降低呼吸作用的能量消耗,从而提高净光合产物积累。这与植物的生理适应性有关,植物在昼夜温差较大的情况下能够更好地调节光合作用和呼吸过程,从而优化其生长,这种机制解释了 DTR 在短期尺度上对 NDVI 的正向促进作用,反映出季节和月尺度上 NDVI 与 DTR 的正相关^[25]。也有研究^[26]发现,较高的 DTR 可通过白天高温增强蒸腾拉力,夜间低温降低水分散失,以此提高植物水分利用效率,这一效应尤其是在水分资源有限的地区能够显著改善植被生长,水分的有效利用直接影响植物的生长能力,是植被生长的关键因素。然而,长期来看, DTR 的持续偏高可能加剧植被的热胁迫,导致植物水热平衡失调,削弱其生长能力,从

而导致 NDVI 与 DTR 的负相关。长期的高 DTR 导致植物的生理压力积累,抑制植物的光合作用效率和生长潜力,尤其是在气候极端化的背景下,这种影响更为显著^[27]。以上机制解释 DTR 在短期尺度上对 NDVI 的正向促进作用和长时间尺度下对 NDVI 的反向抑制作用。

RX1day 和 RX5day 在年尺度上与 NDVI 显著正相关,但在季节和月尺度上表现为负相关。可以解释为:在短时间尺度上,极端降水事件可能导致土壤过饱和、氧气不足,抑制植被生长,从而表现出与 NDVI 的负相关关系。短期内极端降水导致的水分过剩引起土壤透气性差,影响根系呼吸和水分吸收,从而抑制植被生长^[28]。然而,年尺度上,极端降水增多可为植被提供重要水源,从而促进 NDVI 的增加。从生态系统适应性角度看,植被在长期尺度上可以通过调整生长策略以适应气候变化,例如,根系深化、叶片的形态变化、叶面积比增大等^[29],从而在年尺度上呈现与极端降水的正相关,这种适应性可能掩盖短期内降水对植被的负面影响。

本研究还发现,尽管连续干旱天数 (CDD) 与 NDVI 的相关性不显著,但其正相关在红河流域的中、北部区域尤为突出。可能是因为这些地区 (如建水县、石屏县) 石漠化严重,分布着大量旱生植被,这些植物因其独特的生理结构和生态适应性,即使在连续干旱的条件下也能维持较好的生长状态^[30]。这一现象表明,植被对降水的响应还可能受多种因素调控,包括植被类型、土壤性质及地下水补给能力。未来研究应进一步整合植被类型、土壤条件、地下水位等生态环境因子,通过高时间和空间分辨率的数据集,更深入地探讨极端气候事件对 NDVI 的多尺度响应机制。这将为全球变化背景下生态系统保护与适应性管理提供更为全面的科学依据。

4 结 论

1) 红河流域 NDVI 总体处于较高水平,年平均 NDVI 值为 0.68, NDVI 总体呈显著上升趋势,增加速率为 0.035/10 a ($p < 0.01$, $R^2 = 0.78$); 空间上呈“南高北低、西高东低”的空间分布格局。

2) 近年来,红河流域极端高温事件趋多趋强,且极端暖指数表现出比极端冷指数更明显的升温幅度;极端降水事件的发生频次持续降低,连续湿润天数 CWD 以 0.42 d/10 a 的速率显著下降,红河流域整体呈暖干化态势。

3) 极端暖事件与植被生长之间存在显著正相关,冷事件的增加对植被生长具有显著的抑制效应。

植被对极端降水的适应性较强,主要表现为大雨日数(R20mm)和暴雨日数(R25mm)与NDVI间的显著正相关(相关系数分别为0.326和0.323, $p < 0.01$)。

4)NDVI对极端气候事件的响应在不同时间尺度上具有显著差异。总体来看,极端气温对NDVI变化的贡献率高于极端降水,表明气温对流域植被影响更为强烈。

参考文献:

- [1] 靖娟利,孙佳荟,赵婷,等.西南地区植被NPP对多尺度气象干旱的响应[J].水土保持学报,2024,38(3):335-344.
JING J L, SUN J H, ZHAO T, et al. Response of vegetation NPP to multiscale meteorological drought in southwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 335-344.
- [2] 孙美荣,孙鹏森,张明芳,等.气候变化和人类活动对流域水文恢复力影响的研究进展[J].水土保持学报,2022,36(2):13-24.
SUN M R, SUN P S, ZHANG M F, et al. Progress in the effects of climate change and human activities on watershed hydrological resilience[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 13-24.
- [3] STOCKER T. Climate change 2013: The physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 134-136.
- [4] 周波涛,钱进.IPCC AR6报告解读:极端天气气候事件变化[J].气候变化研究进展,2021,17(6):713-718.
ZHOU B T, QIAN J. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6 [J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718.
- [5] WANG F, WANG Z M, YANG H B, et al. Copula-based drought analysis using standardized precipitation evapotranspiration index: A case study in the Yellow River basin, China[J]. Water, 2019, 11(6): e1298.
- [6] 耿庆玲,陈晓青,赫晓慧,等.中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应[J].生态学报,2022,42(9):3557-3568.
GENG Q L, CHEN X Q, HE X H, et al. Vegetation dynamics and its response to climate change and human activities based on different vegetation types in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3557-3568.
- [7] CAI S H, SONG X N, HU R H, et al. Ecosystem-dependent responses of vegetation coverage on the Tibetan Plateau to climate factors and their lag periods [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(6): e394.
- [8] WU D H, ZHAO X, LIANG S L, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change [J]. Global Change Biology, 2015, 21(9): 3520-3531.
- [9] OLTHOF I, LATIFOVIC R. Short-term response of Arctic vegetation NDVI to temperature anomalies [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(21): 4823-4840.
- [10] 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]. Remote Sensing, 2023, 15(19): e4683.
- [11] LI X, ZHANG K, LI X. Responses of vegetation growth to climate change over the Tibetan Plateau from 1982 to 2018 [J]. Environmental Research Communications, 2022, 4(4): e045007.
- [12] 张晋霞,徐长春,杨秋萍.2001—2017年新疆NDVI变化及其对极端气候的响应[J].水土保持通报,2020,40(5):250-256.
ZHANG J X, XU C C, YANG Q P. NDVI variations and its response to extreme climate in Xinjiang Uygur Autonomous Region during 2001—2017 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 250-256.
- [13] 高滢,孙虎,徐崑尧,等.陕西省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J].生态学报,2022,42(3):1022-1033.
GAO Y, SUN H, XU Y Y, et al. Temporal and spatial variation of vegetation cover and its response to extreme climate in Shaanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 1022-1033.
- [14] 郑海亮,房世峰,刘成程,等.青藏高原月NDVI时空动态变化及其对气候变化的响应[J].地球信息科学学报,2019,21(2):201-214.
ZHENG H L, FANG S F, LIU C C, et al. Dynamics of monthly vegetation activity and its responses to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(2): 201-214.
- [15] 王文玲,李运刚,何大明.红河流域气温和蒸发量时空变化分析[J].云南地理环境研究,2008,20(2):109-114.
WANG W L, LI Y G, HE D M. Analysis on spatio-temporal distribution and changes of temperature and evaporation in Red River basin [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2008, 20(2): 109-114.
- [16] AYBAR C, WU Q S, BAUTISTA L, et al. Rgee: An R package for interacting with Google Earth Engine [J]. The Journal of Open Source Software, 2020, 5(51): e2272.
- [17] 徐洋,杨雅萍.1982—2020年中国5 km分辨率逐月NDVI数据集[J].中国科学数据,2022,7(1):99-107.
XU Y, YANG Y P. A 5 km resolution dataset of monthly NDVI product of China (1982—2020) [J]. China Scientific Data, 2022, 7(1): 99-107.

- [18] HAMED K H, RAMACHANDRA RAO A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204(1/4): 182-196.
- [19] 王晓利, 侯西勇. 1982—2014 年中国沿海地区归一化植被指数(NDVI)变化及其对极端气候的响应[J]. *地理研究*, 2019, 38(4): 807-821.
WANG X L, HOU X Y. Variation of Normalized Difference Vegetation Index and its response to extreme climate in coastal China during 1982—2014[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(4): 807-821.
- [20] 孙瑞, 张方敏, 翁升恒, 等. 2001—2021 年中国 NDVI 时空格局变化及对气候的响应[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(10): 5519-5528.
SUN R, ZHANG F M, WENG S H, et al. Spatio-temporal changes of NDVI and its response to climate in China from 2001 to 2021 [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(10): 5519-5528.
- [21] 马炳鑫, 和彩霞, 靖娟利, 等. 1982—2019 年中国西南地区植被变化归因研究[J]. *地理学报*, 2023, 78(3): 714-728.
MA B X, HE C X, JING J L, et al. Attribution of vegetation dynamics in southwest China from 1982 to 2019 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(3): 714-728.
- [22] 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]. *Sustainability*, 2022, 14(14): e8291.
- [23] 尹文有, 肖子牛, 郑皎, 等. 红河流域气温变化的气候特征分析[J]. *云南地理环境研究*, 2008, 20(增刊 1): 1-6.
YIN W Y, XIAO Z N, ZHENG J, et al. Climate characteristics of temperature variation in Honghe River watershed [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2008, 20(S1): 1-6.
- [24] CUI L F, WANG L C, QU S, et al. Spatiotemporal extremes of temperature and precipitation during 1960—2015 in the Yangtze River basin (China) and impacts on vegetation dynamics[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 136(1): 675-692.
- [25] ZHANG X R, CAO Q, CHEN H, et al. Effect of vegetation carryover and climate variability on the seasonal growth of vegetation in the upper and middle reaches of the Yellow River basin [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): e5011.
- [26] YUAN J F, BIAN Z F, YAN Q W, et al. An approach to the temporal and spatial characteristics of vegetation in the growing season in western China [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(6): e945.
- [27] GUO W C, LIU H Y, WU X C. Vegetation greening despite weakening coupling between vegetation growth and temperature over the boreal region[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(8): 2376-2387.
- [28] WANG J, PRICE K P, RICH P M. Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18): 3827-3844.
- [29] KÜNZI Y, ZEITER M, FISCHER M, et al. Rooting depth and specific leaf area modify the impact of experimental drought duration on temperate grassland species [J]. *Journal of Ecology*, 2025, 113(2): 445-458.
- [30] 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理[J]. *植物生态学报*, 2011, 35: 991-999.
GUO K, LIU C, DDONG M. Ecological adaptation of plants and control of rocky-desertification on karst region of southwest China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35: 991-999.