

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.023

陈超男,王丽园,朱文博,等.秦巴山地极端气候变化特征及其对植被动态的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):276-287.

CHEN Chaonan, WANG Liyuan, ZHU Wenbo, et al. Characteristics of extreme climate change in the Qinling-Daba mountains and its impact on vegetation dynamics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 276-287.

秦巴山地极端气候变化特征及其对植被动态的影响

陈超男¹, 王丽园¹, 朱文博^{1,2,3}, 朱连奇¹, 董庆栋¹, 李艳红¹, 任 涵¹

(1.河南大学地理与环境学院,河南 开封 475004;2.河南大学区域发展与规划研究中心,河南 开封 475004;

3.河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室,河南 开封 475004)

摘 要: [目的] 为探究秦巴山地极端气候事件的时空变化及其对植被的影响。[方法] 基于秦巴山地及其周边 115 个气象站逐日气象资料(1960—2020 年)及 MODIS NDVI 数据集(2000—2020 年),分析秦巴山地 NDVI 的时空变化特征及其对 19 个极端气候指数的响应,并利用地理探测器定量评估极端气候指数对 NDVI 的影响。[结果] (1)2000—2020 年秦巴山地大部分区域 NDVI 呈显著增加趋势(80.34%),少数区域呈显著下降趋势(1.09%),研究区年际变化速率约为 0.03/10 a。(2)1960—2020 年秦巴山地经历显著增温,夜间增温幅度大于白天,极端气温事件变化幅度较大的区域主要集中在西秦岭;极端降水事件呈微弱变化,具有明显的空间分异,研究区西南部极端降水强度增加,东部极端降水强度降低,极端降水频率增加。(3)极端降水事件是影响西秦岭地区 NDVI 的主要因素,而极端气温事件是影响秦岭和大巴山地区 NDVI 的主要因素;极端气候事件对 NDVI 的影响不是独立的,极端气候指数间的相互作用以双因子或非线性的方式增强单因子对 NDVI 的影响。[结论] 揭示秦巴山地极端气候事件及植被动态的时空变化特征,明确两者间的相互关系,可为应对全球气候变化下秦巴山地植被保护与恢复提供科学依据。

关键词: 极端气候事件; NDVI; 时空变化; 地理探测器; 秦巴山地

中图分类号:P423.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)03-0276-12

Characteristics of Extreme Climate Change in the Qinling-Daba Mountains and Its Impact on Vegetation Dynamics

CHEN Chaonan¹, WANG Liyuan¹, ZHU Wenbo^{1,2,3}, ZHU Lianqi¹,

DONG Qingdong¹, LI Yanhong¹, REN Han¹

(1.College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China;

2. Research Center of Regional Development and Planning, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China;

3. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Reaches of Yellow River, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China)

Abstract: [Objective] This study was aimed to understand the spatiotemporal changes in extreme climate and its influence on vegetation. [Methods] Based on daily meteorological data (1960—2020) from 115 weather stations in the Qinling-Daba mountains (QBMs) and surrounding areas and satellite-derived normalized difference vegetation index (NDVI), the spatiotemporal variation characteristics of the NDVI in the QBMs and its response to 19 extreme climate indices were analyzed. Geographic detector was used to identify the contribution rate of extreme climate indices and their influence on the NDVI. [Results] (1) The NDVI significantly increased in the majority of the QBMs (80.34%) and decreased in only a few regions (1.09%) from 2000 to 2020. The interannual change rate in the study area was approximately 0.03/10 a. (2) Noticeable warming was observed in the QBMs from 1960 to 2020, with the temperature increasing more at night than during the day, and regions with a larger change in extreme temperature events were mostly found

收稿日期:2023-11-10

修回日期:2023-12-06

录用日期:2024-04-11

网络首发日期(www.cnki.net):2024-04-11

资助项目:国家重点研发计划项目(2021YFE0106700);国家自然科学基金项目(42201110)

第一作者:陈超男(1994—),女,河南新乡人,博士研究生,主要从事秦巴山地植被变化及其气候驱动研究。E-mail:Chencn2019@henu.edu.cn

通信作者:朱文博(1989—),女,河南开封人,博士,硕士生导师,主要从事山地资源环境研究。E-mail:zhuwenbo@henu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

in the Western Qinling Mountains (WQMs). During the study period, extreme precipitation events showed weak changes, extreme precipitation intensity increased in the southwestern QBMs, while in the eastern QBMs, extreme precipitation intensity decreased but extreme precipitation frequency increased. (3) Extreme precipitation events were the main factor affecting NDVI in the west Qinling region, while extreme temperature events were the main factor affecting NDVI in the Qinling and Daba mountain regions; the impact of extreme climate events on NDVI was not independent, and the interaction between extreme climate indices enhances the impact of a single factor on NDVI in a double-factor or nonlinear way. [Conclusion] The spatiotemporal changes in extreme climate and its influence on vegetation were clarified, which could establish scientific evidence for the protection and restoration of vegetation in the QBMs in response to global climate change.

Keywords: extreme climate events; NDVI; spatiotemporal change; geographic detector; Qinling-Daba mountains

Received: 2023-11-10

Revised: 2023-12-06

Accepted: 2024-01-15

Online(www.cnki.net): 2024-04-11

在全球变暖大背景下,极端气候事件的频率、强度和持续时间都在增加^[1],是人类面临最严峻的挑战之一^[2]。近年来,全球大部分地区的极端气温事件表现为极端冷事件减少、极端暖事件增加,且日最低气温的增温幅度明显大于日最高气温^[2-3]。极端降水事件普遍呈增加趋势,但其变化具有较强的区域和局地特征,时空一致性远不如极端气温事件^[1]。此外,现有证据证实,频繁和持续的极端气候变化将对陆地生态系统造成严重、更持久和不可逆转的破坏^[2,4]。植被作为陆地生态系统的重要组成部分,在物质循环和能量流动中起着关键作用,且对气候变化十分敏感,是全球气候变化的“指示器”^[5]。而植被变化的全球效应(如通过云量、水分含量和大气环流)和局地尺度地表能量平衡的变化(如通过地表反照率、蒸散发和地表粗糙度)也在调节气候中发挥关键作用^[6]。因此,了解植被对极端气候变化的响应是全球气候变化研究的重要组成部分。评估植被与极端气候变化间的关系有助于了解植被对气候变化的敏感性,对减缓和适应气候变化至关重要^[3]。

温度与降水的相互作用通过影响植被生长条件(如土壤水分、微生物活性、养分有效性和大气条件)对全球不同地区的植被活动施加复杂而多样的约束^[7]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是反映植被覆盖度的有效指标,可检测区域生态环境的变化,被广泛应用于地理学和生态学等领域^[4-5]。已有研究^[3]表明,温度和降水对NDVI的时空分布和变化有显著影响,在空间上,此影响因植被类型、纬度、海拔和气候等因素而异。虽然,有大量研究探讨平均气候参数与植被覆盖度间的相关性,但关于极端气候对植被影响的研究仍然

有限。

近年来,频繁而长期的极端气候事件已显著影响区域植被生长^[2-4,8-11]。HE等^[8]分析全球旱地的植被动态变化发现,极端气温对植被生长的影响明显大于平均气温,极端降水的影响小于平均降水的影响;而在东北亚地区,极端降水与NDVI的相关性强于平均降水^[9];在中国,极端降水是影响内蒙古^[10]和黄河流域^[11]NDVI的主导因素,而长江^[12]和鄱阳湖盆地^[13]NDVI与极端气温的关系更为密切,与极端降水的相关性不显著。尽管中国极端气候事件变化显著,但其对生态系统的影响研究主要集中在干旱和半干旱地区^[3,13],中国中部地区植被对极端气候的动态响应还未有系统的时空研究。

秦巴山地位于中国中部,主要包括秦岭和大巴山,是中国南北过渡带的主要组成部分^[5]。特殊的地理位置造就该区域复杂多样的植被类型和过渡性气候类型,使植被对气候变化的响应进一步复杂化^[1,5]。在全球气候变化背景下,秦巴山地的气候和植被覆盖都发生显著变化^[1,5,14-16]。然而,以往关于秦巴山地植被及其对气候响应的研究主要集中在陕西境内,以上研究只分析NDVI与平均气候参数间的关系,且得出的结论具有一定的争议性。刘宪锋等^[14]发现,降水而不是气温是影响NDVI变化的主要气候因子,与雒新萍^[15]和邓晨晖等^[16]的结论相矛盾。研究极端气候事件如何影响秦巴山地植被的研究较少,导致对极端气候与该区域植被关系的认识不完整。因此,利用MODIS NDVI产品和基于周边115个气象资料计算的19个极端气候指数,研究NDVI与极端气候事件的时空变化及其相互关系,可为应对全球气候变化下秦巴山地植被保护与恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

秦巴山地(30°42′—35°30′N,102°24′—114°42′E)位于我国中部,面积约 $3\times10^5\text{ km}^2$ (图 1)。该地区地形复杂,东部为山地平原,中部为丘陵盆地,西部为高原山地,海拔范围约为 400~5 000 m。秦巴山地是我国亚热带向暖温带的过渡带,特殊的地理位置造成该区域植被类型复杂多样,主要包括针叶林、阔叶林、灌木、草地和栽培植被。秦巴山地环境复杂多变,年平均气温为 12~17℃,年平均降水量为 500~1 500 mm^[5]。

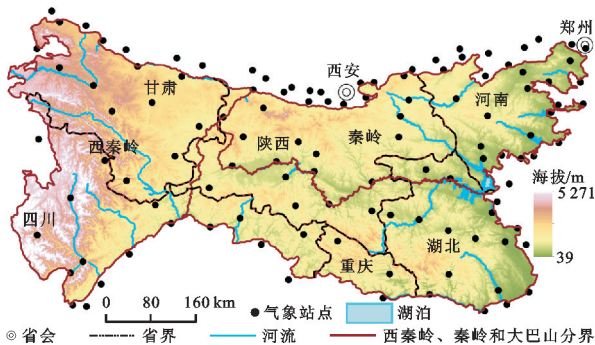


图 1 秦巴山地地理位置、地形及气象站点分布示意
Fig. 1 Location map and meteorological observatories in the Qinling-Daba mountains

1.2 数据来源

1.2.1 NDVI 植被遥感数据集来源于美国国家航空航天局月合成的 1 km MOD13A3 NDVI 数据集(<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>),时间跨度为 2000—2020 年。采用最大合成法^[10]对该数据集进行处理,构建秦巴山地植被多年 NDVI 数据集,用以监测植被变化及其对极端气候指数的响应。

1.2.2 气象数据 气象数据来源于国家气象局发布的中国地面气候资料日值数据集(<http://data.cma.cn/>),时间跨度为 1960—2020 年。使用该数据集的最高气温(℃)、最低气温(℃)和降水量(mm)3 个气象指标。计算极端气候指数,首先,利用 RCLimdex 对秦巴山地所有地面观测气象数据进行质量控制,将不合理的数值记录为缺失值,然后,剔除 1 年中缺失数据超过 30 天的站点,共筛选出 115 个站点(图 1);其次,采用历史多年平均值对所选站点的缺失值进行插补,以保证气象资料的一致性和完整性;最后,基于 RCLimdex 计算 19 个极端气候指数(9 个极端气温指数和 10 个极端降水指数,表 1)。为进一步分析研究区在研究时段内极端气候事件的时空变化,采用反距离加权法对 1960—2020 年站点极端气候数据进行插值,以得到 19 组 1 km 的栅格数据集。

表 1 本研究选取的极端气候指标

Table 1 The extreme climate indices selected in this study

指数类型	名称	定义	指数类型	名称	定义
极端降水指数	RX1day	1 日最大降水量	极端气温指数	TXn	日最高气温极小值
		每年内连续 1 天降水量最大值(mm)			月内日最高气温最小值(℃)
	RX5day	5 日最大降水量		TXx	日最高气温极大值
		每年内连续 5 天降水量最大值(mm)			月内日最高气温最大值(℃)
	PRCPTOT	雨日降水总量		TNn	日最低气温极小值
		雨日(日降水量≥1 mm)降水总量(mm)			月内日最低气温最小值(℃)
	R95p	异常降水总量		TNx	日最低气温极大值
		每年日降水量>95%分位值的降水量总和(mm)			月内日最低气温最大值(℃)
	R99p	极端降水总量		DTR	气温日较差
		每年日降水量>99%分位值的降水量总和(mm)			月最高温与月最低温的差值(℃)
	CDD	持续干燥日数		TN10p	冷夜日数
		日降水量<1 mm 的最长连续日数(天)			日最低气温<10%分位值的日数(天)
	CWD	持续湿润日数		TN90p	暖夜日数
		日降水量≥1 mm 的最长连续日数(天)			日最低气温>90%分位值的日数(天)
	R10	中雨日数		TX10p	冷昼日数
		每年日降水量≥10 mm 的总日数(天)			日最高气温<10%分位值的日数(天)
	R20	大雨日数		TX90p	暖昼日数
		每年日降水量≥20 mm 的总日数(天)			日最高气温>90%分位值的日数(天)
	R25	暴雨日数			
		每年日降水量≥25 mm 的总日数(天)			

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析 采用线性回归方法分析 NDVI 和极端气候指数的年际变化趋势。为了解 NDVI 和极端气候指数年际变化趋势的空间分布,逐像元计算自

变量回归方程的斜率来表征其年变化速率。并使用 t 检验来统计变化的显著性,其中, $p<0.01$, $p<0.05$ 及 $p>0.05$ 分别表示年际变化通过 99%,95%显著性检验及无明显变化。计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{\sum_{i=1}^n i \times x_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)}{\sum_{i=1}^n i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中： n 为总监测年数； x 为 NDVI 或极端气候指数； i 为每年序数； x_i 为第 i 年的 x 值；当 $\text{slope} > 0$ ，表明 x 呈增加趋势，反之则呈降低趋势。

1.3.2 相关分析 利用 Pearson 相关分析探究 2000—2020 年秦巴山地 NDVI 与极端气候指数间的关系，并用 t 检验来确定研究时段内相关性统计结果的显著性。由于 NDVI 数据集时间限制，相关分析时间段为 2000—2020 年。计算公式为：

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

式中： n 为总监测年数； r_{xy} 为相关系数，其取值为 $-1 \sim 1$ ； x_i 和 y_i 分别为第 i 年 x 及 y 的数值； $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 x 及 y 的年平均值。

1.3.3 地理探测器 地理探测器是一种探测空间异质性并量化驱动因素贡献率的统计方法^[17]。将秦巴山地划分为西秦岭、秦岭和大巴山 3 个区域，利用因子探测和交互探测分别探讨单个极端气候指数和 2 个极端气候指数间的交互作用对秦巴山地不同区域 NDVI 的影响。其中，因子检测可检测极端气候指数对 NDVI 空间分异的解释力，解释力用 q 来衡量，计算公式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

式中： q 为极端气候指数对 NDVI 的解释力，取值为 $0 \sim 1$ ，越接近 1 表示解释力越强； h ($h = 1, 2, 3, \dots, L$) 为分类； N_h 和 N 分别为 h 类的单元数和整个区域的单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别为 h 类和全区的方差。 q 服从

非中心 F 检验，可用表格或地理探测器检验 q 是否显著，计算公式为：

$$F = \frac{N-L}{L-1} \frac{q}{1-q} \sim F(L-1, N-L; W) \quad (4)$$

$$\omega = \frac{1}{\sigma^2} \left[\sum_{h=1}^L \bar{Y}_h^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{h=1}^L \sqrt{N_h} \bar{Y}_h \right)^2 \right] \quad (5)$$

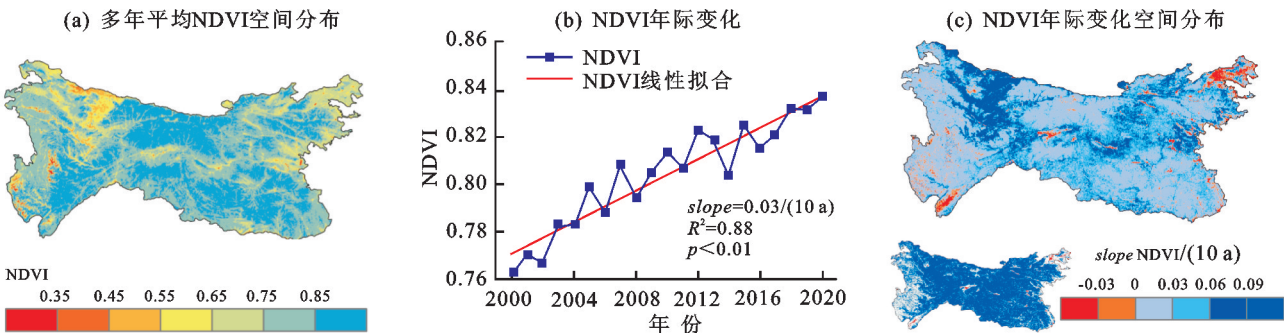
式中： ω 为非中心参数； $\bar{Y}_h$ 为 h 类的平均值。

交互探测可识别 2 个极端气候指数的交互作用对 NDVI 的影响，交互作用对 NDVI 的影响既可相互增强或减弱，也可是相互独立地。假设极端气候指数 Z_1 和 Z_2 对 NDVI 的贡献率分别为 $q(Z_1)$ 和 $q(Z_2)$ ， Z_1 与 Z_2 交互作用对 NDVI 的贡献率可以表示为 $q(Z_1 \cap Z_2)$ ，通过比较 $q(Z_1 \cap Z_2)$ 与 $q(Z_1)$ 、 $q(Z_2)$ 的大小可确定影响性质。结果可分为非线性减弱 $q(Z_1 \cap Z_2) < \min[q(Z_1), q(Z_2)]$ ；单因子非线性减弱 $\min[q(Z_1), q(Z_2)] < q(Z_1 \cap Z_2) < \max[q(Z_1), q(Z_2)]$ ；双因子增强 $q(Z_1 \cap Z_2) > \max[q(Z_1), q(Z_2)]$ ；非线性增强 $q(Z_1 \cap Z_2) > q(Z_1) + q(Z_2)$ ；独立 $q(Z_1 \cap Z_2) = q(Z_1) + q(Z_2)$ 。

2 结果与分析

2.1 秦巴山地 NDVI 的空间分布及其时空变化特征

图 2 为 2000—2020 年秦巴山地多年平均 NDVI 的空间分布格局及年际变化。由图 2a 可知，多年平均 NDVI 为 $0.22 \sim 0.93$ ，平均值为 0.80，呈“中间高、边缘低”的空间分布格局。NDVI 高值中心主要集中于森林茂密、植被覆盖度高的神农架、米仓山、太白山及伏牛山等地区， $\text{NDVI} > 0.85$ ；山脉周边地区 NDVI 略有下降，大部分 NDVI 为 $0.75 \sim 0.85$ ；研究区中部的汉中盆地和东北部的洛阳、郑州等低海拔地区植被类型以栽培作物为主，NDVI 约为 $0.55 \sim 0.75$ ；在研究区西北部，特别是受水热条件限制的高海拔地区，植被相对稀疏，主要由灌丛、草地和高寒草甸组成， $\text{NDVI} < 0.55$ ，是研究区 NDVI 的低值中心。



注：图 c 插图为 NDVI 显著变化 ($p < 0.05$) 区域，蓝色为显著增加，红色为显著减少。

图 2 2000—2020 年秦巴山地多年平均 NDVI 空间分布及其年际变化趋势

Fig. 2 The spatial distribution pattern of the multi-year average NDVI and the change trends of the average annual NDVI in the Qinling-Daba mountains during 2000—2020

由图 2b 可知,2000—2020 年秦巴山地多年平均 NDVI 呈显著增加趋势,速率为 0.03/10 a ($p < 0.01$)。NDVI 年际变化的空间分布趋势表明,研究区 $283.55 \times 10^3 \text{ km}^2$ (94.52%) NDVI 呈增加趋势,其

中, $241.02 \times 10^3 \text{ km}^2$ (80.34%) 为显著增加,仅 $16.45 \times 10^3 \text{ km}^2$ (5.48%) 呈减少趋势,通过显著性检验的区域仅占 1.09%,主要分布在研究区东北部和西南部地区(图 2c、表 2)。

表 2 秦巴山地 NDVI 和极端气候指数变化面积及其比例

Table 2 Change areas and proportions of NDVI and extreme climate indices in the Qinling—Daba mountains $\times 10^3 \cdot \text{km}^2 (\%)$

指数	面积	增加	显著增加	降低	显著降低
植被指数	NDVI	283.55(94.52)	241.02(80.34)	16.45(5.48)	3.28(1.09)
	TXn	299.74(99.91)	227.07(75.69)	0.26(0.09)	—
	TNn	295.87(98.62)	183.80(61.27)	4.13(1.38)	—
	TNx	269.14(89.71)	160.47(53.49)	30.86(10.29)	1.31(0.44)
极端温度指数	TXx	260.01(86.67)	183.58(61.19)	39.98(13.33)	0.48(0.16)
	TN90p	299.57(99.86)	295.36(98.45)	0.43(0.14)	—
	TX90p	299.10(99.70)	274.45(91.48)	0.90(0.30)	—
	TN10p	0.07(0.02)	—	299.93(99.98)	297.52(99.17)
	TX10p	0.19(0.06)	—	299.81(99.94)	249.10(83.03)
	DTR	154.78(51.59)	32.97(10.99)	145.22(48.41)	67.24(22.41)
	RX1day	203.76(67.92)	5.87(1.96)	96.24(32.08)	0.50(0.17)
	RX5day	102.37(34.12)	0.85(0.28)	197.63(65.88)	0.86(0.29)
	PRCPTOT	90.72(30.24)	—	209.27(69.76)	0.30(0.10)
	R95p	214.13(71.38)	4.68(1.56)	85.87(28.62)	0.18(0.06)
极端降水指数	R99p	188.57(62.86)	14.84(4.95)	111.43(37.14)	1.10(0.37)
	CDD	157.06(52.35)	0.38(0.13)	141.61(47.20)	5.06(1.69)
	CWD	44.30(14.77)	—	255.70(85.23)	26.02(8.67)
	R10	82.14(27.38)	1.44(0.48)	217.86(72.62)	1.81(0.60)
	R20	192.26(64.09)	4.98(1.66)	107.74(35.91)	0.85(0.28)
	R25	217.41(72.47)	4.13(1.38)	82.59(27.53)	—

注:“—”表示无数据。

2.2 秦巴山地极端气候指数的时空变化特征

2.2.1 极端气候的年际变化 图 3 为 1960—2020 年秦巴山地极端气候指数年际变化示意图。就极端气温指数而言, TXx 、 TNx 、 TXn 、 TNn 、 $TN90p$ 及 $TX90p$ 均呈显著增加趋势,速率分别为 0.14, 0.15, 0.28, 0.31 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 及 3.27, 2.39 $\text{d}/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$, 图 3a、图 3b)。而 $TN10p$ 和 $TX10p$ 以 3.03 $\text{d}/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$) 和 1.52 $\text{d}/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$) 的速率呈显著下降趋势(图 3c)。DTR 在研究时段内呈微弱下降,速率为 0.04 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ ($p > 0.05$)。总体而言,研究区在研究时段内极端暖事件增加,极端冷事件减少,夜间增温幅度较比白天更为显著。研究区在研究时段内极端降水指数呈微弱变化(图 3d、图 3f)。其中, $RX1\text{day}$ 、 $R95p$ 、 $R99p$ 、 $R20$ 和 $R25$ 呈上升趋势,速率分别为 0.25, 2.01, 0.81 $\text{mm}/10 \text{ a}$ 及 0.07, 0.10 $\text{d}/10 \text{ a}$, 而 $RX5\text{day}$ 、 $PRCPTOT$ 、 CDD 、 CWD 和 $R10$ 分别以 0.54, 3.87 $\text{mm}/10 \text{ a}$ 及 0.34, 0.08, 0.11 $\text{d}/10 \text{ a}$ 的速率下降,但所有极端降水指数变化均未通过显著性检验。

2.2.2 极端气候年际变化的空间分布 为进一步探

究 1960—2020 年秦巴山地极端气候的年际变化,逐像元计算其线性拟合方程的斜率表征其变化趋势,并对结果进行统计(图 4、表 2)。就极端气温而言,研究区 TXn 呈增加趋势的面积比例约为 99.91%,其中, 75.69% 为显著增加,主要集中在西秦岭、陕西秦岭及大巴山。 TNn 和 TNx 呈显著增加趋势的面积比例分别为 61.27% 和 53.49%,主要集中在西秦岭和研究区东部边缘,仅 1.38% 和 10.29% 呈显著降低趋势(图 4b、图 4c)。 TXx 大部分区域呈增加趋势,其中, 61.19% 区域为显著增加,主要集中在西秦岭及大巴山南坡(图 4d)。 $TN90p$ 和 $TX90p$ 主要呈显著上升趋势,面积分别约为 295.36×10^3 (98.45%), $274.45 \times 10^3 \text{ km}^2$ (91.48%) (图 4e、图 4f), 而 $TN10p$ 和 $TX10p$ 则主要呈显著下降趋势,面积分别约为 297.52×10^3 (99.17%), $249.10 \times 10^3 \text{ km}^2$ (83.03%) (图 4g、图 4h)。DTR 显著变化的区域较少,仅 32.97×10^3 (10.99%), $67.24 \times 10^3 \text{ km}^2$ (22.41%) 呈显著下降和显著增加,其中,显著增加区域主要集中在秦岭西段和大巴山南坡,显著下降区域主要集中在研究区

西部及东部边缘地区(图 4i、表 2)。总体而言,1960—2020 年秦巴山地极端气温指数变化显著,升温幅度较大的区域主要位于西秦岭地区。

研究时段内,研究区极端降水指数变化较弱(图 4j、图 4s)。RX1day 呈增加和减少的区域面积比例分别为 67.92%和 32.08%,但仅在少数区域通过显著性检验(图 4j)。RX5day 和 PRCPTOT 年际变化的空间分布相似,均以减少趋势为主,减少区域面积比例分别为 65.88%和 69.76%,主要分布在研究区西北部和东部地区,增加趋势主要集中在研究区西南部和陕西秦岭的部分区域(图 4k、图 4l),相反,R95p 和

R99p 则主要表现为增加趋势,增加区域面积比例分别为 71.38%和 62.86%(图 4m、图 4n)。CDD 增加和减少区域相当,面积比例分别为 52.35%和 47.20%,而 CWD 主要呈减少趋势($255.70\times 10^3\text{ km}^2$, 85.23%)(图 4p)。R10、R20、R25 呈增加趋势的面积比例分别为 27.38%,64.09%,72.47%,值得注意的是,3 个指数在豫西山区均呈显著增加趋势(图 4q~图 4s)。综上所述,秦巴山地极端降水指数整体变化较弱,具有显著的空间异质性,西南地区极端降水强度呈增加趋势,东部地区极端降水强度呈减少趋势,但极端降水频率呈增加趋势。

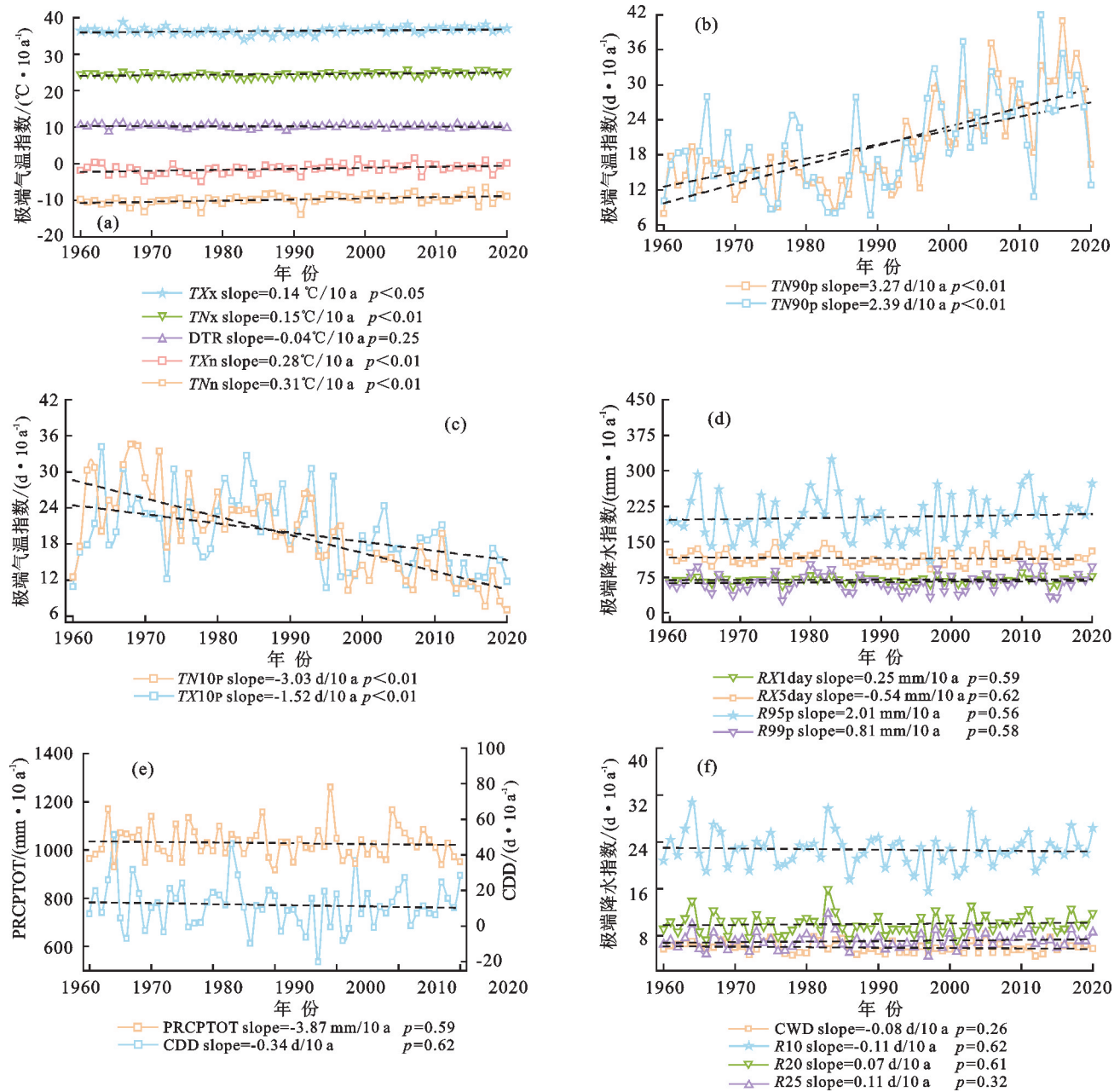


图 3 1960—2020 年秦巴山地极端气候指数年际变化

Fig. 3 The temporal variations of extreme climate indices in the Qinling-Daba mountains during 1960—2020

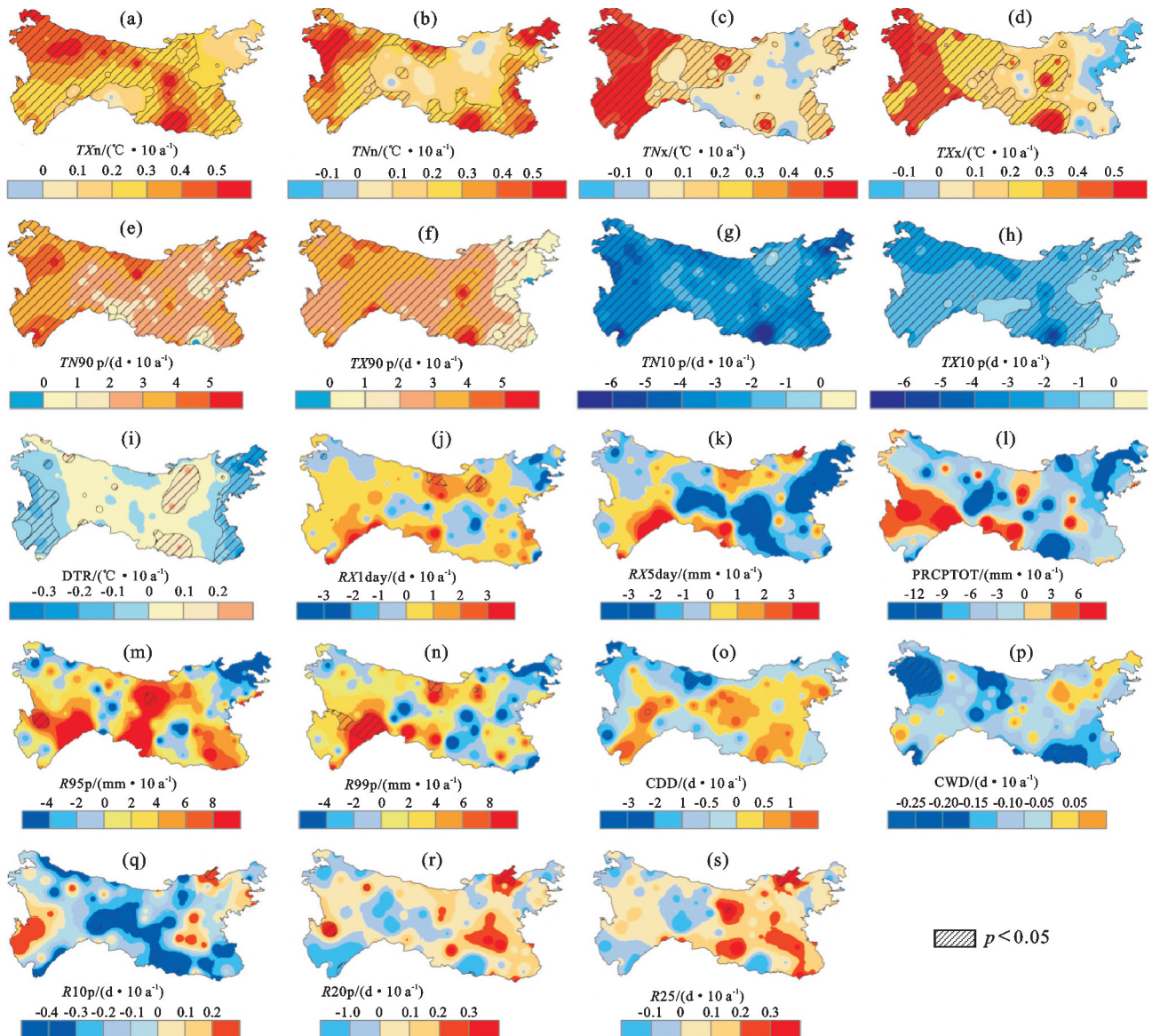


图 4 1960—2020 年秦巴山地极端气候指数年际变化的空间分布

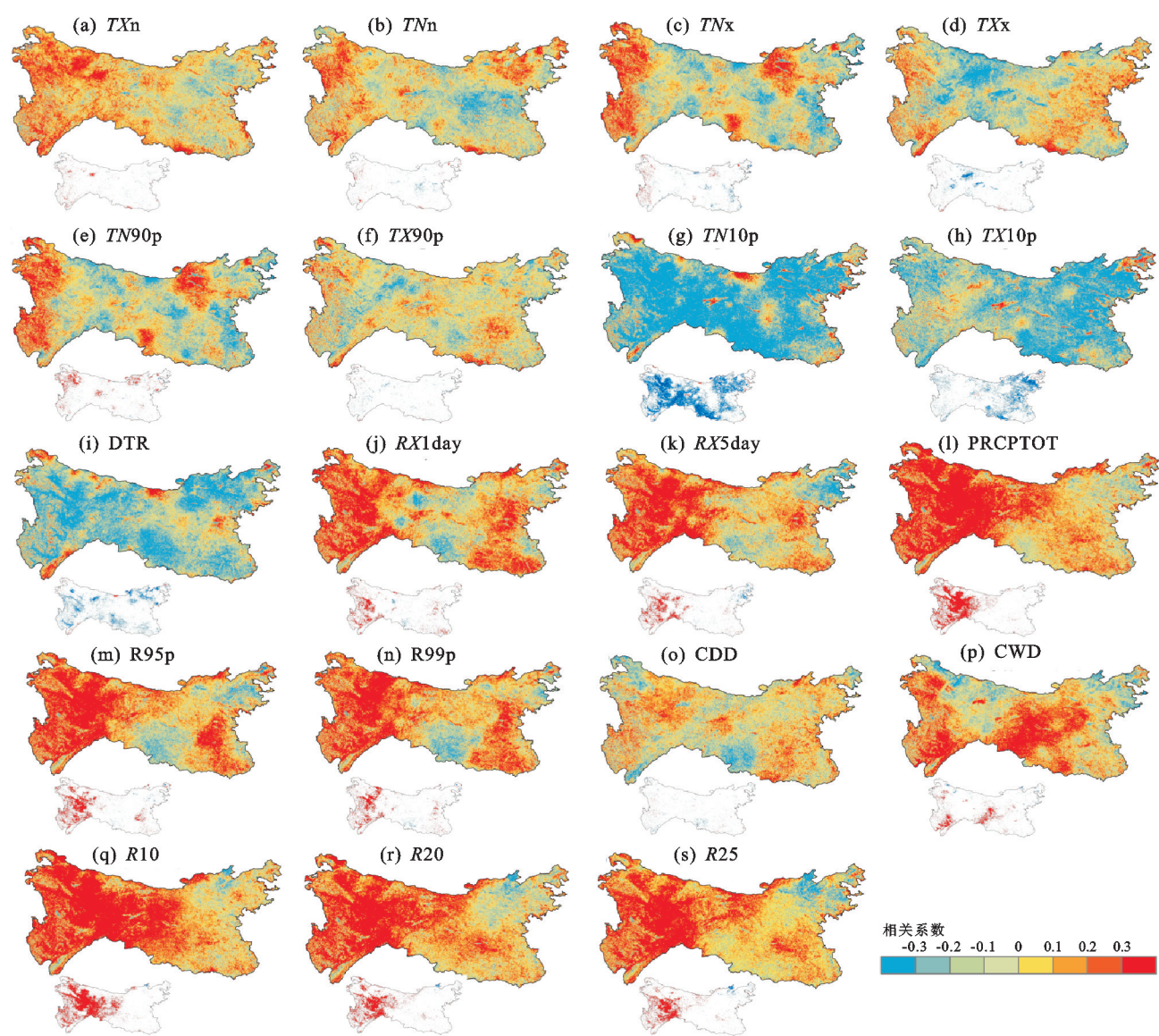
Fig. 4 Spatial distributions of the changing trends in extreme climate indices in the Qinling—Daba mountains during 1960—2020

2.3 秦巴山地极端气候与 NDVI 的相关性

2000—2020 年秦巴山地极端气候指数与 NDVI 相关性的空间分布格局见图 5。NDVI 与 TX_n 、 TN_n 、 TN_x 仅在少数区域呈显著相关,显著正相关区域集中在研究区西部边缘区域,而显著负相关区域零星分布在研究区东部(图 5a~图 5c)。NDVI 与 TX_x 呈显著负相关的区域面积为 $9.77 \times 10^3 \text{ km}^2$ (3.26%),主要分布在陇南市和汉中盆地(图 5d、表 3)。NDVI 与 TN_{90p} 呈显著正相关的区域面积为 $16.28 \times 10^3 \text{ km}^2$ (5.43%),主要分布在研究区西北部、汉中盆地和豫西山(图 5e)。TX90p 与 NDVI 呈显著正相关和显著负相关的区域分别为 1.55×10^3 (0.52%) 和 $3.44 \times 10^3 \text{ km}^2$ (1.15%),零散地分布在整个研究区(图 5f)。此外, TN_{10p} ($266.89 \times 10^3 \text{ km}^2$, 88.99%)、 TX_{10p} ($257.06 \times 10^3 \text{ km}^2$, 85.69%) 和

DTR ($246.51 \times 10^3 \text{ km}^2$, 82.17%) 与 NDVI 主要呈负相关,仅少数区域呈显著正相关(图 5g~图 5i)。

除 PRCPTOT 外,NDVI 与其余 9 个极端降水指数 (RX_{1day} 、 RX_{5day} 、 R_{95p} 、 R_{99p} 、CDD、CWD、 R_{10} 、 R_{20} 和 R_{25}) 均主要呈正相关 ($>50\%$) (图 5j~图 5h)。NDVI 与 RX_{1day} 、 RX_{5day} 、PRCPTOT、 R_{95p} 、 R_{99p} 、 R_{10} 、 R_{20} 和 R_{25} 呈显著正相关的区域分别占 7.44%, 8.66%, 19.04%, 11.64%, 8.41%, 20.94%, 13.12% 和 10.94%,主要分布在西秦岭地区,仅在少数地区与指数呈显著负相关,零星分布在河南省境内(图 5j~图 5n、图 5q~图 5s)。NDVI 与 CDD 间的相关性在少数地区具有统计学意义(图 5o),相比之下,与 CWD 间呈正显著相关的地区则更大,主要分布在研究区西南部和大巴山西段,呈显著负相关的区域主要在天水市、定西市和河南省境内(图 5p)。



注:插图蓝色为显著负相关,红色为显著正相关($p<0.05$)。

图 5 2000—2020 年秦巴山地 NDVI 与极端气候指数的相关性

Fig. 5 The spatial distribution of the relationship between the NDVI and extreme climate indices in the Qinling — Daba mountains during 2000—2020

2.4 秦巴山地 NDVI 影响因子地理探测

将秦巴山地划分为西秦岭、大巴山和秦岭 3 个区域,利用地理探测器探究极端气候事件对植被的解释力(表 4)。在西秦岭地区,极端降水指数对 NDVI 的解释力大于极端气温指数,尤其是 CWD 和 PRCPTOT, q 分别为 0.156($p<0.05$)和 0.140($p<0.05$), TXn 也是影响该区域 NDVI 的重要因素($q=0.134$, $p<0.05$,表 4)。秦岭地区极端气温指数是影响 NDVI 的主要因素, TNx 、 $TX90p$ 、 $TX10p$ 的 q 均 >0.211 ($p<0.05$),CWD 对该区域 NDVI 的影响也非常重要,其 q 为 0.278($p<0.05$)。与秦岭相似,极端气温指数也是影响大巴山 NDVI 的关键因素,而极端降水指数的解释力相对较小。整体而言,极端

气候指数对秦巴山地不同区域 NDVI 的影响具有显著差异,极端降水指数对西秦岭 NDVI 解释力较强,极端气温指数对秦岭和大巴山解释力较强。

由图 6 可知,秦巴山地不同区域极端气候指数两两交互作用对 NDVI 的影响探测结果。在西秦岭、秦岭和大巴山 3 个区域中,2 种极端气候指数相互作用对 NDVI 的 q 均高于其单独作用,即极端气候指数的相互作用以双因子或非线性的形式增强单因子对 NDVI 的影响,而不是独立地影响 NDVI。值得注意的是,秦巴山地不同区域主导因子与其他极端气候指数间存在更强的相互作用。 TXn 、PRCPTOT 和 CWD 与西秦岭其他极端气候指数间存在显著的相互作用;在秦岭地区, TNx 、 $TX90p$ 和 CWD 与其他极

端气候指数的交互作用更显著($p<0.05$);而在大巴山地区, TN_x 、 TX_{90p} 和DTR与其他极端气候指数的交互作用更显著($p<0.05$,图6)。整体而言,极端气候指数间的交互作用强化单因子对NDVI的影响,交互作用不是简单的叠加过程,而是双因子或非线性的方式进行增强。

表 3 2000—2020 年秦巴山地 NDVI 与极端气候指数的相关性面积

Table 3 The areas that showed correlations between the NDVI and extreme climate indices in the Qinling—Daba mountains		10 ³ km ² (%)			
指数	面积	负相关	显著负相关	正相关	显著正相关
极端气温指数	TX_n	116.78(38.93)	1.02(0.34)	183.22(61.07)	6.23(2.08)
	TN_n	160.94(53.65)	2.85(0.95)	139.06(46.35)	3.53(1.18)
	TN_x	165.32(55.11)	6.01(2.00)	134.68(44.89)	6.34(2.11)
	TX_x	172.02(57.34)	9.77(3.26)	127.98(42.66)	2.35(0.78)
	TN_{90p}	78.88(26.29)	1.74(0.58)	221.12(73.71)	16.28(5.43)
	TX_{90p}	174.37(58.12)	3.44(1.15)	125.63(41.88)	1.55(0.52)
	TN_{10p}	266.98(88.99)	109.50(36.50)	33.02(11.01)	1.88(0.63)
	TX_{10p}	257.06(85.69)	42.64(14.21)	42.94(14.31)	1.53(0.51)
	DTR	246.51(82.17)	30.65(10.22)	53.49(17.83)	1.74(0.58)
	RX_{1day}	91.07(30.36)	1.94(0.65)	208.93(69.64)	22.33(7.44)
极端降水指数	RX_{5day}	94.67(31.56)	3.03(1.01)	205.33(68.44)	25.99(8.66)
	PRCPTOT	163.01(54.34)	0.51(0.17)	136.99(45.66)	57.13(19.04)
	R_{95p}	85.12(28.37)	1.61(0.54)	214.88(71.63)	34.92(11.64)
	R_{99p}	79.15(26.38)	1.66(0.55)	220.85(73.62)	25.22(8.41)
	CDD	142.85(47.62)	2.78(0.93)	157.15(52.38)	2.18(0.73)
	CWD	108.18(36.06)	2.02(0.67)	191.82(63.94)	18.58(6.19)
	R_{10}	57.01(19.00)	0.76(0.25)	242.99(81.00)	62.81(20.94)
	R_{20}	70.10(23.37)	1.11(0.37)	229.90(76.63)	39.35(13.12)
	R_{25}	82.56(27.52)	2.22(0.74)	217.44(72.48)	32.83(10.94)

表 4 秦巴山地不同分区极端气候指数对植被 NDVI 解释力 q

Table 4 The contribution rate (q -value) of extreme climate indices to the NDVI in different regions of the Qinling—Daba mountains							
因子	西秦岭	秦岭	大巴山	因子	西秦岭	秦岭	大巴山
TX_n	0.134 *	0.041	0.075 *	RX_{1day}	0.126 *	0.043	0.018
TN_n	0.101 *	0.056	0.090	RX_{5day}	0.125 *	0.017	0.048 *
TN_x	0.058 *	0.290 *	0.117 *	PRCPTOT	0.140 *	0.146 *	0.029
TX_x	0.045 *	0.180 *	0.036	R_{95p}	0.111 *	0.110 *	0.031
TN_{90p}	0.020	0.027	0.051	R_{99p}	0.103 *	0.083 *	0.034
TX_{90p}	0.038	0.263 *	0.094	CDD	0.029	0.115 *	0.007
TN_{10p}	0.018	0.054	0.050	CWD	0.156 *	0.278 *	0.084 *
TX_{10p}	0.054 *	0.211 *	0.085 *	R_{10}	0.093 *	0.124 *	0.062
DTR	0.098 *	0.125 *	0.079	R_{20}	0.105 *	0.064	0.026
				R_{25}	0.107 *	0.017	0.025

注: * 表示结果通过 95%置信水平($p<0.05$)。

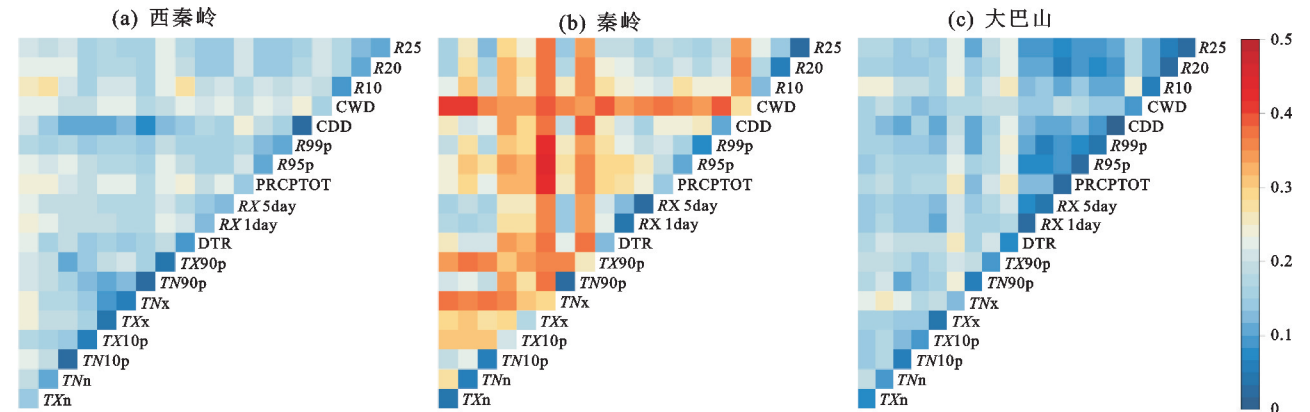


图 6 秦巴山地不同区域极端气候指数对 NDVI 的交互探测

Fig. 6 Interactive detection of NDVI by extreme climate indices in different regions of the Qinling—Daba mountains

3 讨论

3.1 NDVI 时空变化

由于地形、植被类型、城市化水平和气候等因素的差异^[5,14],秦巴山地植被 NDVI 主要呈“中间高、边缘低”的空间分布特征(图 2a)。植被对气候变化十分敏感,大量研究^[3-15]证实植被在全球范围内已发生显著改变。本研究结果显示,2000—2020 年秦巴山地 NDVI 呈显著增加趋势(0.03/10 a, $p < 0.01$, 图 2b),与前人^[5,14]研究结果一致。

在空间变化上,研究区在研究时段内 80.34% 的区域 NDVI 呈显著增加趋势。以往的研究^[5,14-16,18]指出,降水、温度和土壤湿度是秦巴山地 NDVI 增加的重要驱动力,本研究表明,极端气候变化也可能是引起该区域 NDVI 增加的重要因素。气温升高可提高植被的光合作用和水分利用,减轻霜冻损害,而降水增加可大量补充土壤水分,将对植被生长产生积极影响^[4]。此外,由于实施大规模的生态保护和恢复工程,礼县、西河县和天水市 NDVI 增幅尤为突出。然而,随着城市化进程的加快、耕地面积的减少和建设用地的增加,研究区东北部的洛阳市和郑州市植被退化尤为显著^[19]。另外,由于自然灾害、过度放牧、旅游开发等因素,研究区西南部的 NDVI 也呈显著下降趋势^[20]。

3.2 极端气候指数时空变化

在全球变暖大背景下,秦巴山地极端气候事件发生明显改变。本研究表明,1960—2020 年秦巴山地经历显著的增温,具体表现为极端暖事件增加,极端冷事件减少,且夜间增温幅度大于白天,与香薇^[21]研究结果一致。其中,冷夜日数(3.03 d/10 a)的减少幅度是冷昼日数(1.52 d/10 a)的近 2 倍,暖夜日数(3.27 d/10 a)的增加幅度是暖昼日数(2.39 d/10 a)的近 1.8 倍,昼夜变暖的不对称性可能间接导致研究区气温日较差下降。昼夜变暖的不对称性可归因于温室气体浓度、云量、水分含量和降水^[22]等因素。从空间变化上看,极端气温事件变化幅度较大的区域主要分布在西秦岭地区,人类活动、热岛效应、地形和大气环流^[22]都可能是引起此现象的重要因素。研究区在研究时段内极端降水事件变化较弱,且变化幅度具有明显的空间差异。研究区西南部极端降水强度(如 RX1day、RX5day、PRCPTOT、R95p 和 R99p)显著增加,而东部极端降水强度(如 RX5day、PRCPTOT 和 R99p)显著减弱,但极端降水频率(R99p、R20 和 R25)显著增加。自然和人类活动是导致区域气候变化的因素之一,大尺度大气环流强烈影响局地 and 区域极端气候变化,东亚夏季风是气候系统的关键组成部

分之一,对中国大部分地区的降水变化有深远的影响。已有研究^[23]表明,秦巴地区的降水特别是极端降水事件受到亚热带高压、西南季风、夏季季风系统等气候因素的强烈影响。该区域极端降水事件变化分布具有显著的空间差异主要是由大气环流指数,如北极涛动、南方涛动指数和西太平洋指数引起的^[1,23]。此外,极端降水事件的强度、频率和持续时间随海拔、经纬度变化而变化,可能是由于水蒸气的传播方向不同,且持续升温增强陆地和海洋热特性的差异,提高区域气候系统的不稳定,进而导致极端降水事件增加^[23]。秦巴山地地形极其复杂,影响其极端气候事件时空变化的原因有待进一步研究。

3.3 NDVI 对极端气候的响应

2000—2020 年秦巴山地 NDVI 与极端气候的相关性存在明显的空间差异(图 5)。就极端气温而言,从基线值到最优值范围内的温度升高可通过延长生长季、增强光合作用及降低霜冻风险对植被生长产生有利影响^[2,12,17],但持续升高的最高温度将导致土壤水分蒸发、植物自养呼吸增加,进而导致植物干旱胁迫及植被活动减少^[24]。然而,除 TN10p 和 TX10p,其他极端气温指数仅在少数区域与 NDVI 呈显著相关,可能是因为 NDVI 与极端气候指数的关系受研究时空尺度的影响,不同空间和时间尺度可能导致研究的相关性存在一定差异^[5],本研究分析 NDVI 与极端气温间的相互关系是基于年尺度而不是月尺度,可能忽略或低估研究中的一些细节^[3]。

另外,降水是影响植被生长的另一个关键因素。过多的降水导致土壤内涝,可能剥夺植物根系的氧气引起植物死亡;相反,干旱导致植物缺水,更容易受到疾病和害虫的侵害。极端降水事件变化可通过影响土壤含水量、养分有效性和温度,甚至还可能导致土壤侵蚀和土壤退化,从而对植被生长产生负面影响^[8]。在西秦岭地区,NDVI 与极端降水指数主要呈显著正相关,该区域降水量较少,且该区域植被类型主要为草地和灌木,其植物根系储水能力差,土壤不能长时间保持水分,因此,该地区植被对降水更为敏感,降水增加可缓解陆地蓄水压力,从而对植被生长产生积极影响,与前人^[3,13,8]研究结果一致。NDVI 与极端降水呈负相关的区域主要分布在研究区东部和南部等地区,该地区降水丰富,降水增加减少对太阳辐射的吸收,降低平均温度,导致土壤条件更潮湿、更凉爽,抑制植被的生长。此外,东部地区有广泛的森林和栽培植被,森林具有较强的储水能力,人工灌溉可减少对水的需求,从而减轻极端降水事件对植被的影响^[8],因

此,NDVI 与极端降水呈负相关。

因子探测结果表明,影响秦巴山地不同区域 NDVI 主导因子不同(表 4)。西秦岭地区降水相对较少,植被类型主要为草地、灌木,具有较差的储水能力,极端降水指数对 NDVI 的解释力大于极端气温指数,CWD 和 PRCPTOT 是影响该地区 NDVI 的主要因素,与 PENG 等^[25]和何国兴等^[26]的研究结果一致。秦岭和大巴山地区降雨量较多,植被类型以森林为主,森林对温度的响应更强^[27],极端气温指数对 NDVI 的解释力通常大于极端降水指数(表 4)。但极端气候指数间是通过相互作用而不是独立地影响 NDVI,交互作用以双因子或非线性方式增强单因子对 NDVI 的影响,而不是简单的叠加过程。

3.4 不足与展望

采用的 NDVI 和极端气候数据集均为年平均值,在探究 NDVI 与极端气候年际变化及其相互关系时可能忽略一些细节。此外,气候变化对 NDVI 的影响具有一定的时滞效应,不同植被类型对极端气候的响应存在显著差异。不同时间尺度下不同植被类型长时间序列 NDVI 对极端气候变化的响应是未来研究的重点。尽管研究存在局限性,但本研究的结果足够可靠,可用于评估秦巴山地生态系统的脆弱性和恢复能力,为山区植被保护和恢复提供科学依据。

4 结论

(1)2000—2020 年秦巴山地大部分区域 NDVI 呈显著增加趋势,占总面积的 80.34%,仅 1.09%的区域显著降低,年际变化速率为 0.03/10 a($p < 0.01$)。

(2)1960—2020 年秦巴山地经历显著的变暖,具体为极端暖事件增加,极端冷事件减少,夜间增温幅度大于白天,极端气温增加幅度较大的区域主要分布在西秦岭地区;研究区在研究时段内极端降水事件变化整体较弱($p > 0.05$),且表现出较大的空间差异,西南地区表现为极端降水强度增加,东部地区表现为极端降水强度降低,但极端降水频率增加。

(3)秦巴山地不同区域影响 NDVI 的主导因子有所差异。西秦岭地区,极端降水指数是影响该区域 NDVI 的主导因子;而在秦岭和大巴山地区,极端气温指数对 NDVI 的解释力强于极端降水指数。极端气候指数两两之间的相互作用以双因子或非线性方式增强了单因子对 NDVI 的影响。

参考文献:

- [1] WANG L Y, CHEN S F, ZHU W B, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation and its potential driving factors in China's North-South transition zone during 1960—2017 [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 252: e105429.
- [2] PIAO S L, ZHANG X P, CHEN A P, et al. The impacts of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: A review [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62 (10): 1551-1563.
- [3] LI C L, WANG J, HU R C, et al. Relationship between vegetation change and extreme climate indices on the Inner Mongolia Plateau, China, from 1982 to 2013 [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 101-109.
- [4] TAN Z Q, TAO H, JIANG J H, et al. Influences of climate extremes on NDVI (normalized difference vegetation index) in the Poyang Lake basin, China [J]. *Wetlands*, 2015, 35(6): 1033-1042.
- [5] 陈超男,朱连奇,田莉,等.秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J].*生态学报*, 2019, 39(9): 3257-3266.
- [6] CHEN C N, ZHU L Q, TIAN L, et al. Spatial-temporal changes in vegetation characteristics and climate in the Qinling-Daba mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3257-3266.
- [7] CONG N, WANG T, NAN H J, et al. Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: A multi-method analysis [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19 (3): 881-891.
- [8] NEMANI R R, KEELING C D, HASHIMOTO H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [9] HE L, GUO J, YANG W, et al. Multifaceted responses of vegetation to average and extreme climate change over global drylands [J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 858(Pt 2): e159942.
- [10] GUO Z J, LOU W, SUN C, et al. Trend changes of the vegetation activity in northeastern East Asia and the connections with extreme climate indices [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): e3151.
- [11] 苏日罕,郭恩亮,王永芳,等.1982—2020 年内蒙古地区极端气候变化及其对植被的影响[J].*生态学报*, 2023, 43 (1): 419-431.
- [12] SU R H, GUO E L, WANG Y F, et al. Extreme climate changes in the Inner Mongolia and their impacts on vegetation dynamics during 1982—2020 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1): 419-431.
- [13] 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.
- [14] CAO Y, SUN Y L, CHEN Z X, et al. Dynamic changes of vegetation ecological quality in the Yellow River

- Basin and its response to extreme climate during 2000—2020[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(11): 4524-4535.
- [12] 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.
- [13] CHEN K, GE G, BAO G, et al. Impact of extreme climate on the NDVI of different steppe areas in Inner Mongolia, China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14 (7): e1530.
- [14] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 705-716.
- LIU X F, PAN Y Z, ZHU X F, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 705-716.
- [15] 雒新萍. 近 25 a 来秦巴山区植被 NDVI 时空变化及其对区域气候的响应[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- LUO X P. Spatial-temporal changes of NDVI and the response to the regional climate in the Qinling-Daba mountains for 25 years[D]. Xi'an: Northwest University, 2009.
- [16] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 1964—2015 年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应[J]. *地理学报*, 2018, 73(5): 917-931.
- DENG C H, BAI H Y, GAO S, et al. Comprehensive effect of climatic factors on plant phenology in Qinling mountains region during 1964—2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 917-931.
- [17] YAN W B, HE Y L, CAI Y, et al. Relationship between extreme climate indices and spatiotemporal changes of vegetation on Yunnan Plateau from 1982 to 2019 [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 31: ee01813.
- [18] 翟雅倩, 张翀, 周旗, 等. 秦巴山区植被覆盖与土壤湿度时空变化特征及其相互关系[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(7): 967-977.
- ZHAI Y Q, ZHANG C, ZHOU Q, et al. Spatio-temporal variation and interrelationship of vegetation cover and soil moisture in Qinling-Daba mountains[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(7): 967-977.
- [19] 雷明霞. 河南小城镇发展的时空格局、驱动因素及类型识别[D]. 河南 开封: 河南大学, 2022.
- LEI M X. The Space-time pattern and driving force of the development of small towns in Henan province factor and type identification[D]. Kaifeng, Henan: Henan University, 2022.
- [20] 胡君, 李丽, 杜燕, 等. 四川植被研究的回顾与展望[J]. *中国科学: 生命科学*, 2021, 51(3): 264-274.
- HU J, LI L, DU Y, et al. Review and prospect of vegetation research in Sichuan [J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2021, 51(3): 264-274.
- [21] 香薇. 近 42 年秦巴山区极端气候事件的时空变化特征分析[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2018.
- XIANG W. The spatial-temporal variations of extreme temperatures in the Qinling-Daba mountains in recent 42 years[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2018.
- [22] DING Z Y, WANG Y Y, LU R J. An analysis of changes in temperature extremes in the Three River Headwaters region of the Tibetan Plateau during 1961—2016 [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 209: 103-114.
- [23] SHAO Y T, MU X, HE Y, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events at multi-time scales in the Qinling-Daba mountains region, China [J]. *Quaternary International*, 2019, 525(2): 89-102.
- [24] PENG S S, PIAO S L, CIAIS P, et al. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on northern Hemisphere vegetation [J]. *Nature*, 2013, 501: 88-92.
- [25] PENG W F, KUANG T T, TAO S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, Western China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 353-367.
- [26] 何国兴, 韩天虎, 柳小妮, 等. 甘肃省草地植被 NDVI 时空变化特征及驱动因素研究[J]. *草地学报*, 2021, 29(5): 1004-1013.
- HE G X, HAN T H, LIU X N, et al. Spatio-temporal variation and the driving factors of NDVI of grassland vegetation in Gansu province [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(5): 1004-1013.
- [27] JIANG H L, XU X. Impact of extreme climates on vegetation from multiple scales and perspectives in the Agro-pastoral transitional zone of Northern China in the past three decades [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 372: e133459.