

基于 AVHRR 和 MODIS 数据源的山东省植被覆盖 时空变化及其对极端气候的响应

刘健¹, 申浩¹, 王善琦¹, 李鹏², 郑昭佩¹

(1.山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358; 2.济南市生态环境局长清分局, 山东 济南 250300)

摘要: [目的] 研究山东省的植被覆盖变化和极端气候的关系, 以为区域植被生态维护提供科学借鉴。[方法] 基于 AVHRR-GIMMS NDVI 对 MODIS NDVI 插补获取的 1982—2021 年长时间序列 NDVI 数据集, 分析山东省 NDVI 的时空变化, 并结合该省 96 个气象站的逐日数据, 研究 NDVI 对极端气候的响应。[结果] ①山东省及各分区 NDVI 总体呈强持续性的显著上升趋势, 该省平均增速为 $0.013/10\text{ a}$ ($p < 0.001$); 空间上 NDVI 大体呈西高东低, 南高北低分布; 空间趋势上植被覆盖以强持续性显著改善和基本不变为主。②整体上 NDVI 与年和月的极端气温暖指数、极端降水指数以显著正相关为主, 与冷指数以显著负相关为主, 与 GSL、DTR 相关性不显著; 空间上鲁西平原区主要受极端气温的影响, 其他分区对极端气温和极端降水均响应明显。③NDVI 对极端气候的响应具有明显的滞后性, 且对极端气温的滞后性比对极端降水的滞后性强。[结论] 山东省植被覆盖总体向持续改善的方向发展; NDVI 对极端气候响应明显, 极端高温和极端降水对植被生长总体起促进作用, 而极端低温以抑制作用为主; 植被覆盖变化对极端气候响应存在滞后性。

关键词: NDVI; 时空变化; 极端气候; 相关性; 山东省

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)02-0173-10

中图分类号: Q948.1, P467

文献参数: 刘健, 申浩, 王善琦, 等. 基于 AVHRR 和 MODIS 数据源的山东省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 173-182. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.021; Liu Jian, Shen Hao, Wang Shanqi, et al. Temporal and spatial variation of vegetation cover and its response to extreme climate in Shandong Province based on AVHRR and MODIS data sources [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 173-182.

Temporal and Spatial Variation of Vegetation Cover and Its Response to Extreme Climate in Shandong Province Based on AVHRR and MODIS Data Sources

Liu Jian¹, Shen Hao¹, Wang Shanqi¹, Li Peng², Zheng Zhaopei¹

(1.College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250358, China;

2.Changqing Branch of Jinan Ecological Environmental Protection Bureau, Jinan, Shandong 250300, China)

Abstract: [Objective] The relationship between vegetation cover changes and extreme climate in Shandong Province was studied in order to provide a reference for regional vegetation ecological maintenance. [Methods] Based on the 1982—2021 long-term NDVI data set obtained from AVHRR-GIMMS NDVI interpolation of MODIS NDVI, the temporal and spatial changes of NDVI in Shandong Province were analyzed, and the daily data of 96 weather stations in the province were combined to study the response of NDVI to extreme climate. [Results] ① NDVI in Shandong Province and its subregions showed an overall strong and sustained upward trend, with an average growth rate of $0.013/10\text{ yr}$ ($p < 0.001$) for the entire province. NDVI was generally high in the west and low in the east, and high in the south and low in the north. On the spatial scale, the vegetation cover was mainly improved and basically unchanged in strong sustainability. ② On the whole, NDVI showed a significant positive correlation with annual and monthly

收稿日期: 2022-07-11

修回日期: 2022-08-09

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“棕壤坡面颗粒有机碳流失对团聚体破碎的响应”(41907055)

第一作者: 刘健(1998—), 男(汉族), 山东省日照市人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境保护。Email: liujian19980831@163.com。

通讯作者: 郑昭佩(1971—), 男(汉族), 山东省邹城市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事生态环境保护与修复方面的研究。Email: zzp999@163.com。

extreme temperature and extreme precipitation indices; a significant negative correlation with the cold index; and no significant correlation with GSL and DTR. Western Shandong Plain was mainly affected by extreme temperature, and other subregions responded greatly to both extreme temperature and extreme precipitation. ③ The response of NDVI to extreme climate exhibited obvious hysteresis, and the hysteresis of extreme temperature was stronger than that of extreme precipitation. [Conclusion] The overall vegetation coverage in Shandong Province was developing in the direction of continuous improvement. NDVI exhibited an obvious response to extreme climate. Extreme high temperature and extreme precipitation promoted vegetation growth, while extreme low temperature mainly inhibited vegetation growth. There was a lag in the response of vegetation cover changes to extreme climates.

Keywords: NDVI; temporal and spatial variation; extreme climate; correlation; Shandong Province

对于植被覆盖变化的研究常借助基于遥感的植被指数数据,其中归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)最为常用,且与植被覆盖度显著线性相关^[1],能估算和监测植被覆盖及其变化。常用的 NDVI 数据包括 SPOT-VGT NDVI^[2]、AVHRR-GIMMS NDVI^[3]和 MODIS NDVI^[4]。其中,AVHRR-GIMMS NDVI 数据集的时间范围最长,但其空间分辨率较低,且 2015 年以后的数据不再更新;另两种数据集的时间范围较短,但其空间分辨率较高,且数据仍在持续更新^[5]。因此,结合运用不同的 NDVI 数据获取长时间序列、高分辨率的 NDVI 数据集是进行植被覆盖变化研究的可行措施。气候是植被覆盖的重要影响因子,相比于均态气候,植被对极端气候敏感度更高,且地域差异更为突出^[6-7]。近年来,国内外关于植被覆盖变化与极端气候相关性的研究已陆续开展。在陕西省的研究中发现,不同区域的植被覆盖受极端气候的影响存在差异,北部主要受极端降水的影响,而南部主要受极端气温的影响^[4]。在内蒙古地区,年尺度上 NDVI 与极端降水和极端低温呈正相关、与极端高温呈负相关,而月和季尺度上 NDVI 与大多数极端气候指数呈正相关^[8]。在孟加拉国^[9]和中亚地区^[10],年、季、月尺度下 NDVI 与极端气候呈现出不同的相关性,且不同的极端气候指数亦存在差异。可以看出,在不同的区域和时间尺度下,植被覆盖对极端气候的响应具有明显的差异。另外,在我国沿海^[3]、陕西省^[4]、内蒙古等^[8]地区的研究发现,植被对极端气候的响应存在一定的滞后性。

山东省植被覆盖对极端气候的响应尚不明确。本文利用一元线性回归模型,应用 GIMMS NDVI 对 MODIS NDVI 进行插补,获取 1982—2021 年的山东省长时间序列 NDVI 数据,结合 1982—2020 年日气温和降水数据,分析山东省多年 NDVI 的时空变化和持续性以及 NDVI 对极端气候的响应和滞后性。本研究对区域的植被覆盖变化和极端气候与植被覆

盖关系进行深入研究,以期为气候变化背景下区域的植被生态维护提供借鉴。

1 研究区概况

山东省位于中国东部,北临渤海、东临黄海,地处黄河下游,该省陆域面积为 $1.56 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。该省主要为山地、丘陵和平原地形,季风气候显著,河流均为季风区雨源型河流。根据《山东省生态保护与建设规划(2014—2020 年)》中的生态保护与建设区域布局,将全省陆域划为 4 个分区,分别为鲁北平原区(Ⅰ)、鲁西平原区(Ⅱ)、鲁中南山地丘陵区(Ⅲ)和鲁东低山丘陵区(Ⅳ)。

2 数据来源与预处理

气象资料来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)。根据各站点原始数据采集情况,采用 1982—2020 年山东省境内 96 个气象站点的日降水量、日最高和日最低气温数据,并利用 RCLIMDEX 模型^[11]的质量控制模块进行异常值和错误值的筛选与剔除,缺失值用相邻站点的数据代替。NDVI 数据为 AVHRR-GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 两种数据集。GIMMS NDVI 数据集来源于国家青藏高原数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/>)的“全球 GIMMS NDVI3g v1 数据集(1981—2015 年)”,该数据集来自美国航空航天局(NASA)全球监测与模型研究组(GIMMS)提供的 NOAA/AVHRR NDVI 数据,空间分辨率为 8 km,时间序列为 1982 年 1 月至 2015 年 12 月,为半月最大值合成数据。MODIS NDVI 数据集来源于美国国家航空航天局(NASA)的 EOS/MODIS 数据产品中的 MOD13Q1 NDVI 数据(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>),时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 250 m,时间序列为 2000 年 2 月至 2021 年 12 月。数据集均进行校正、投影转换、裁剪、质量控制和真实值计算。将 NDVI

小于 0.1 的区域认为非植被区,不做分析^[12-13]。为减少云、大气、太阳高度角等因素对 NDVI 值的影响,对影像利用最大值合成法获得月 NDVI 数据,并利用均值合成法获得年 NDVI 数据。

3 研究方法

3.1 GIMMS NDVI 与 MODIS NDVI 的一致性检验及数据插补

由于获取两种数据集的传感器不同,其波段范围有差异,不能直接同时进行时间序列分析,因此,需要对两种数据进行一致性检验。两种 NDVI 数据的分辨率不同,在一致性检验之前需要将检验数据的分辨率统一。两种数据的重合时段为 2000 年 2 月至 2015 年 12 月,将该时段的 MODIS NDVI 重采样为 8 km 分辨率。将高分辨率影像转换到低分辨率且尺度转换因子(重采样分辨率与原分辨率之比)大于 5 时,传统的重采样方法(最邻近法、双线性插值法、立方卷积内插法)会损失较多信息而不再适用^[14],因此,对 MODIS NDVI 数据重采样时采用局部平均法,GIMMS NDVI 中每个像元对应 MODIS NDVI 中同位置的 32×32 个像元,将影像 32×32 窗口的均值作为 8 km 分辨率下对应像元的值,便得到 8 km 分辨率的 MODIS NDVI 数据。在重合时段内分别对每年两种年均值 NDVI 数据的所有像元进行相关分析,得到各年的相关系数均大于 0.85,均通过了 0.001 置信度检验。其中最大相关系数为 0.91(2014 年),因此采用 2014 年的两种年均值 NDVI 数据进行线性拟合。为保留 MODIS NDVI 的高分辨率信息,选择用 GIMMS NDVI 对 MODIS NDVI 数据进行插补,即以 GIMMS NDVI 为自变量($NDVI_G$),MODIS NDVI 为因变量($NDVI_M$),得到二者线性回归方程: $NDVI_M = 0.830\ 6 \times NDVI_G + 0.067\ 0$ ($R^2 = 0.83$, $RMSE = 0.03$, $n = 2\ 395$),之后利用该方程对 1982—2000 年的 MODIS NDVI 数据进行插补。插补产生的数据分辨率为 8 km,而 MODIS NDVI 数据分辨率为 250 m,故将插补的数据重采样为 250 m 分辨率,以便于后续对数据进行统一分析。

3.2 极端气候指数的计算

采用由 ETCCDMI (expert team on climate change detection and indices)提供的 29 个极端气候指数(表 1)^[15]。基于山东省 96 个气象站点的日降水量、日最高气温和日最低气温数据,利用 RClimDex 模型^[11]进行极端气候指数计算。另外,根据极端气

温指数的特点,将其分为暖指数(SU_{25} , TR_{20} , $WSDI$, T_{max} , TN_x , TX_x , TN_{90p} , TX_{90p})、冷指数(FD_0 , ID_0 , $CSDI$, T_{min} , TN_n , TX_n , TN_{10p} , TX_{10p})和其他指数(GSL , DTR)。

3.3 统计分析方法

3.3.1 趋势分析 利用 Sen 斜率估计法^[16]计算山东省及各分区 NDVI 变化的趋势度(slope),正值表示上升趋势,负值表示下降趋势。并结合 Mann-Kendall(M-K)方法^[17]对趋势的显著性进行检验。

3.3.2 Hurst 指数 利用 R/S 法计算山东省及各分区 NDVI 的 Hurst 指数(H)以反映其变化趋势的持续性, H 的值域为 $[0, 1]$ 。 $H < 0.5$ 表示序列具有反持续性,即未来与过去的变化趋势相反,且越接近 0,其反持续性越强; $H > 0.5$ 表示序列具有持续性,未来与过去的变化趋势一致,且越接近 1,其持续性越强; $H = 0.5$ 表示序列变化具有完全随机性,未来与过去的变化趋势无关^[18]。根据吕洋等^[19]的标准,将 Hurst 指数划分为 4 个等级: $H \leq 0.35$ 为强反持续性, $0.35 < H < 0.5$ 为弱反持续性, $0.5 < H < 0.65$ 为弱持续性, $H \geq 0.65$ 为强持续性。

3.3.3 相关分析 采用 Pearson 相关系数,度量山东省及各分区 NDVI 和极端气候指数的相关性,并利用 t 统计量检验其显著性,定量化分析 NDVI 对气候要素的响应特征^[20]。

3.3.4 去季节化 由于极端气候月指数和月尺度 NDVI 均具有显著的季节变化特征,而同步的季节变化趋势显然会夸大由于二者本身因果关系所产生的相关性。因此,利用标准化法^[21]对其进行去季节化处理。计算过程为:

构建山东省历年 NDVI 或各极端气候指数的各月值矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \cdots & A_{1,12} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \cdots & A_{2,12} \\ \vdots & \vdots & A_{i,j} & \vdots \\ A_{N,1} & A_{N,2} & \cdots & A_{N,12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

矩阵 A 中,行变量 N 表示年份数,列为各月 NDVI 或极端气候指数的值。计算历年中各月 NDVI 或极端气候指数的均值 $\overline{A_j}$:

$$\overline{A_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_{i,j} \quad (2)$$

对历年中各月 NDVI 或极端气候指数的值进行标准化得到去季节化的矩阵 $X_{i,j}$:

$$X_{i,j} = A_{i,j} - \overline{A_j} \quad (3)$$

表 1 极端气候指数
Table 1 Indicators of extreme climate

分 类	代 码	名称及单位	定 义
极端 气 温 指 数	FD ₀	霜日 日数/d	年内日最低气温<0℃的日数
	SU ₂₅	夏日 日数/d	年内日最高气温>25℃的日数
	ID ₀	结冰 日数/d	年内日最高气温<0℃的日数
	TR ₂₀	炎热夜数/d	年内日最低气温>20℃的日数
	GSL	生长季日数/d	年内连续 6 d 日均温>5℃与连续 6 d<5℃的间日数
	WSDI	热持续指数/d	年内连续 6 d 及以上日最高气温>90%分位值的累计日数
	CSDI	冷持续指数/d	年内连续 6 d 及以上日最低气温<10%分位值的累计日数
	DTR	气温日较差/℃	每月日最高、最低气温差值的均值
	T _{max}	日最高气温的均值/℃	每月日最高气温的均值
	T _{min}	日最低气温的均值/℃	每月日最低气温的均值
	TN _n	日最低气温的极低值/℃	每月日最低气温的最小值
	TN _x	日最低气温的极高值/℃	每月日最低气温的最大值
	TX _n	日最高气温的极低值/℃	每月日最高气温的最小值
	TX _x	日最高气温的极高值/℃	每月日最高气温的最大值
	TN _{10p}	冷夜日数/d	每月日最低气温<10%分位值的日数
	TN _{90p}	暖夜日数/d	每月日最低气温>90%分位值的日数
	TX _{10p}	冷昼日数/d	每月日最高气温<10%分位值的日数
	TX _{90p}	暖昼日数/d	每月日最高气温>90%分位值的日数
极端 降 水 指 数	CDD	持续干燥指数/d	年内日降水量<1 mm 最长持续日数
	CWD	持续湿润指数/d	年内日降水量≥1 mm 最长持续日数
	PRCPTOT	雨日降水总量/mm	年内雨日(日降水量≥1 mm)累计降水总量
	R ₁₀	中雨日数/d	年内日降水量≥10 mm 的日数
	R ₂₀	大雨日数/d	年内日降水量≥20 mm 的日数
	R ₂₅	暴雨日数/d	年内日降水量≥25 mm 的日数
	R _{95p}	强降水量/mm	年内日降水量≥95%分位值的所有降水量之和
	R _{99p}	极强降水量/mm	年内日降水量≥99%分位值的所有降水量之和
	SDII	降水强度指数/(mm·d ⁻¹)	年内雨日(日降水量≥1 mm)降水总量与降水日数之比
	RX _{1day}	单日最大降水量/mm	每月最大 1 d 的降水量
	RX _{5day}	连续 5 d 最大降水量/mm	每月连续 5 d 的最大降水量

4 结果与分析

4.1 NDVI 时空变化特征

4.1.1 时间变化特征 图 1 显示,1982—2021 年山东省及各分区平均 NDVI 均显著增长。全省增长速率为 0.013/10 a($p<0.001$),各分区中Ⅱ区速率最大(0.019/10 a),Ⅳ区速率最小(0.007/10 a),表明山东省及各分区植被覆盖整体呈显著上升趋势,但区域间存在明显的速率差异;全省及各分区 Hurst 指数均在 0.75 以上,表明未来该趋势持续性强。值得注意的是,在 1998—2002 年期间山东省以及各分区平均 NDVI 明显下降,下降幅度为 14.07%,平均下降速率达 0.155/10 a,2003 年起逐渐恢复增长趋势。

4.1.2 空间分布及变化特征 空间分布上(图 2),各分区 NDVI 均值表现为:Ⅱ区(0.47)>Ⅲ区(0.43)>Ⅳ区(0.41)>Ⅰ区(0.35),总体显示出西高东低、南高

北低的空间格局。其中,Ⅰ区的渤海湾南岸植被覆盖较差,全省 NDVI 均值小于 0.2 的部分有 87.14%分布在 该区域。空间变化上,利用趋势分析法得到山东省 NDVI 的 slope 值域范围为-0.076~0.099,根据 NDVI 变化趋势差异将 slope 分为 5 类,分别为严重退化($\text{slope}\leqslant-0.005$)、轻度退化($-0.005<\text{slope}<-0.001$)、基本不变($-0.001\leqslant\text{slope}\leqslant0.001$)、轻度改善($0.001<\text{slope}<0.005$)、明显改善($\text{slope}\geqslant0.005$);计算 M-K 显著性检验的统计量 Z 按 $p=0.05$ 置信度划分为显著($|Z|>1.96$)和不显著($|Z|\leqslant1.96$);计算 Hurst 指数并将其划分为强反持续性、弱反持续性、弱持续性和强持续性。

结合以上划分并绘制 NDVI 变化趋势及持续性空间分布图(图 2)。其中,强持续性轻度改善、强持续性基本不变、强持续性轻度退化、强持续性明显改善、强持续性严重退化 5 种情况的面积最大,分别

占全省面积的 52.75%,23.77%,13.83%,5.15% 和 1.44%,其他情况占 3.06%。可见,山东省及各分区植被覆盖以强持续性轻度改善和基本不变为主,合计

约占全省面积的 76%,但在Ⅲ区的南四湖地区以及全省的部分城市区域集中出现强持续性严重退化趋势。

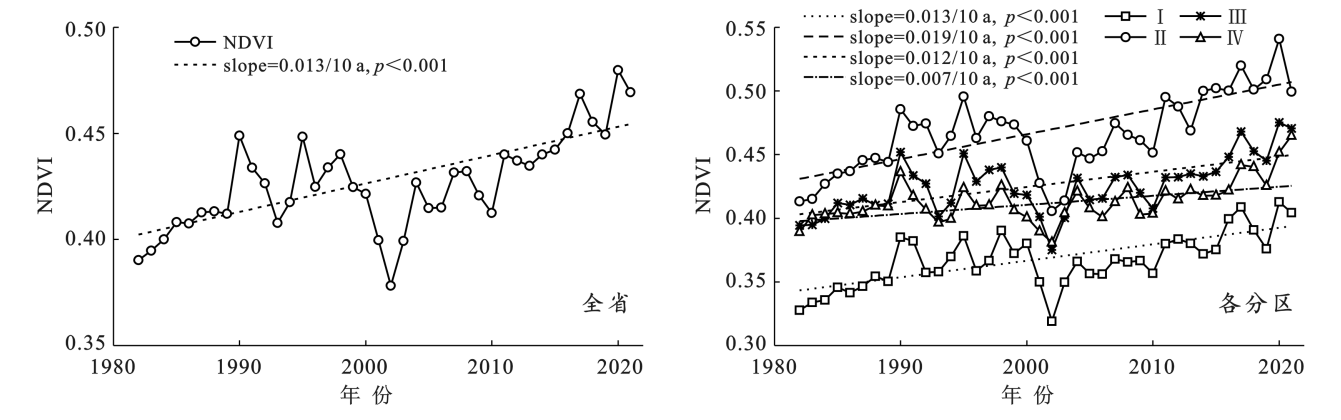


图 1 山东省及各分区 1982—2021 年 NDVI 年际变化趋势

Fig.1 Annual variation trend of NDVI in Shandong Province and its subregions during 1982—2021

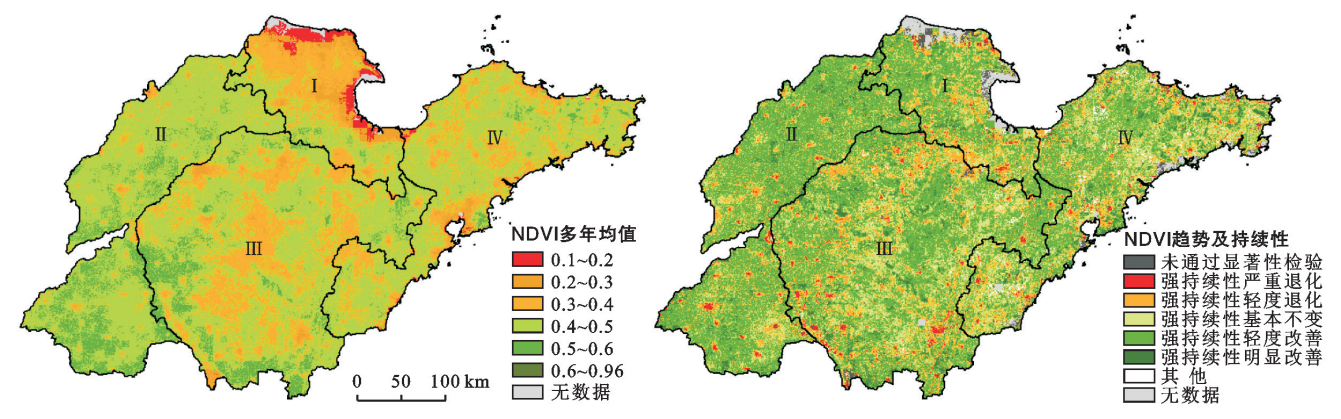


图 2 山东省 1982—2021 年 NDVI 多年均值空间分布和变化趋势及持续性

Fig.2 Spatial distribution of multi-year mean value, variation trend and sustainability of NDVI in Shandong Province during 1982—2021

4.2 NDVI 对极端气候的响应

4.2.1 NDVI 与极端气温的相关性 图 3 显示的是山东省 NDVI 与极端气温年指数的相关性。NDVI 与暖指数(SU_{25} , TR_{20} , $WSDI$)主要呈正相关,其中与 TR_{20} 的平均相关系数为 0.54($p<0.01$),且有 52.18% 的区域呈显著正相关,表明高温日数增加能够在一定程度上促进植被生长。NDVI 与冷指数(FD_0 , ID_0 , $CSDI$)主要呈负相关,其中与 FD_0 和 $CSDI$ 的平均相关系数分别为 -0.45 和 -0.44 ($p<0.01$),且分别有 48.75% 和 38.76% 的区域呈显著负相关,表明低温日数的增加对植被生长有一定的抑制。NDVI 与 GSL 整体相关性不显著,显著正相关区域仅占 21.28%,表明大部分地区的植被对生长季日数变化响应不敏感。

同时,NDVI 与极端气温年指数的显著相关区域在空间上总体呈现均匀分布。不同的是,NDVI 与 ID_0 主要在Ⅱ区呈显著负相关,占全省显著负相关区

域的 70.88%,而其他分区相关性较弱。Ⅱ区为山东省粮食主产区,表明全天零下的极端低温对农田植被的生长抑制作用明显。

图 4 显示的是山东省 NDVI 与极端气温月指数的相关性。NDVI 与暖指数(T_{max} , TN_x , TX_x , TN_{90p} , TX_{90p})主要呈正相关,平均相关系数多通过极显著检验($p<0.01$),且分别有 42.43%,43.63%,23.82%,49.72%,26.28% 的区域呈显著正相关,表明气温升高和高温日数增加均能够在一定程度上促进当地植被生长。在冷指数(T_{min} , TN_n , TX_n , TN_{10p} , TX_{10p})中,NDVI 与 T_{min} , TN_n , TX_n 主要呈正相关,平均相关系数均通过显著性检验($p<0.05$),且分别有 54.02%,44.15%,29.75% 的区域呈显著正相关;与 TN_{10p} , TX_{10p} 主要呈负相关,平均相关系数为 -0.19 和 -0.14 ($p<0.01$),且分别有 53.78%,38.33% 的区域呈显著负相关,这表明极端低温降低和低温日数增加

使植被难以获得足够的生长积温,对植被生长具有一定的抑制作用。NDVI 与 DTR 整体相关性不显著,仅有 26.75% 的区域呈显著负相关。相比于年尺度而言,植被对月尺度极端气温的响应总体更为明显。

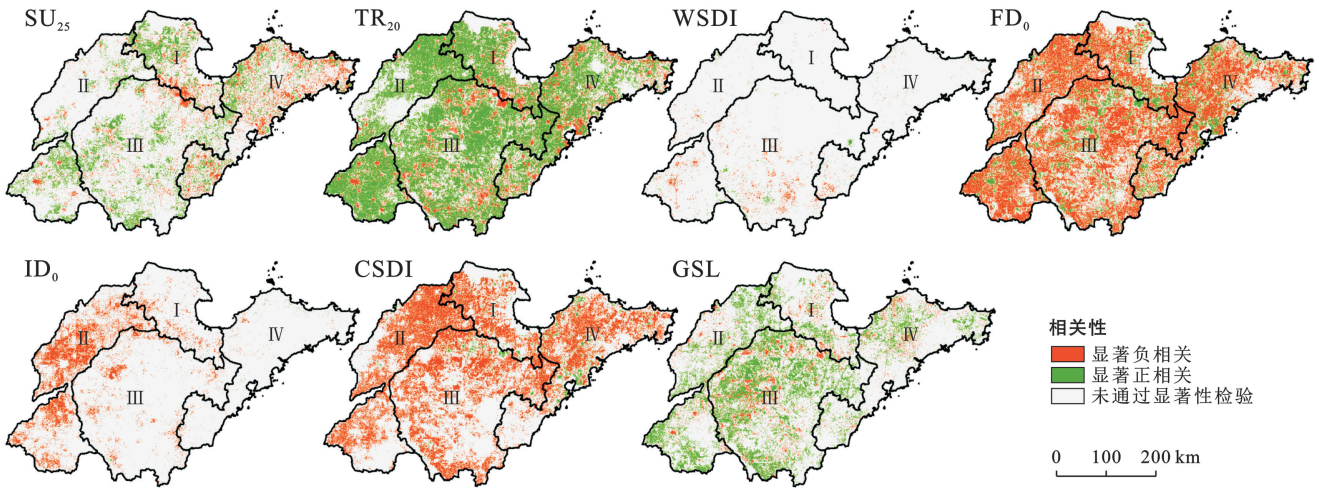


图 3 山东省 1982—2020 年 NDVI 与极端气温年指数的相关性 ($p<0.05$)

Fig.3 Correlation between NDVI and annual indicates of extreme temperature in Shandong Province during 1982—2020 ($p<0.05$)

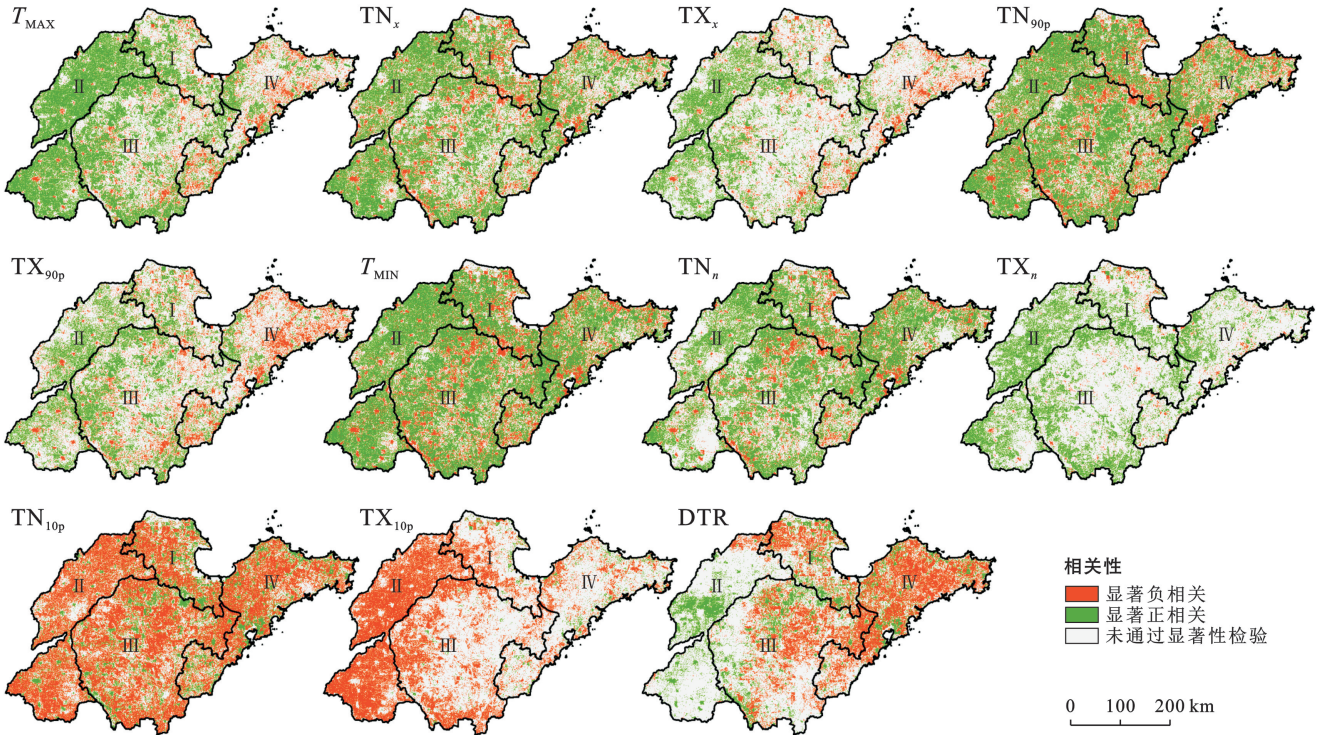


图 4 山东省 1982—2020 年 NDVI 与极端气温月指数的相关性 ($p<0.05$)

Fig.4 Correlation between NDVI and monthly indicates of extreme temperature in Shandong Province during 1982—2020 ($p<0.05$)

空间上,NDVI 与极端气温月指数的相关性以均匀分布为主,个别指数有空间差异。其中,NDVI 与 T_{max} , TX_x 的显著正相关区域和 TX_{10p} 的显著负相关区域均主要分布在 II 区,表明农田植被受极端气温影响更大。

另外,NDVI 与 DTR 主要在 IV 区呈显著负相关,表明气温日较差的增大会对沿海地区的植被生长产

生一定的抑制作用。

4.2.2 NDVI 与极端降水的相关性 图 5 显示的是山东省 NDVI 与极端降水年指数的相关性。NDVI 与各指数主要呈正相关,除 CDD 和 CWD 无明显相关性外,平均相关系数多通过显著性检验 ($p<0.05$),但显著正相关区域占比较低,最高仅占 16.85% (PRCPTOT)。空间上,NDVI 与极端降水年指数在

I 区和Ⅲ区的相关性较显著,而在Ⅱ区和Ⅳ区相关性较弱,空间异质性明显。PRCPTOT, R_{95p} 和 R_{99p} 为表征降水量的指数, R_{10} , R_{20} , R_{25} 为表征降水日数的指数,SDII 为表征降水强度的指数,表明降水量和降水日数增多以及降水强度增大均能够在一定程度上促进当地植被生长。

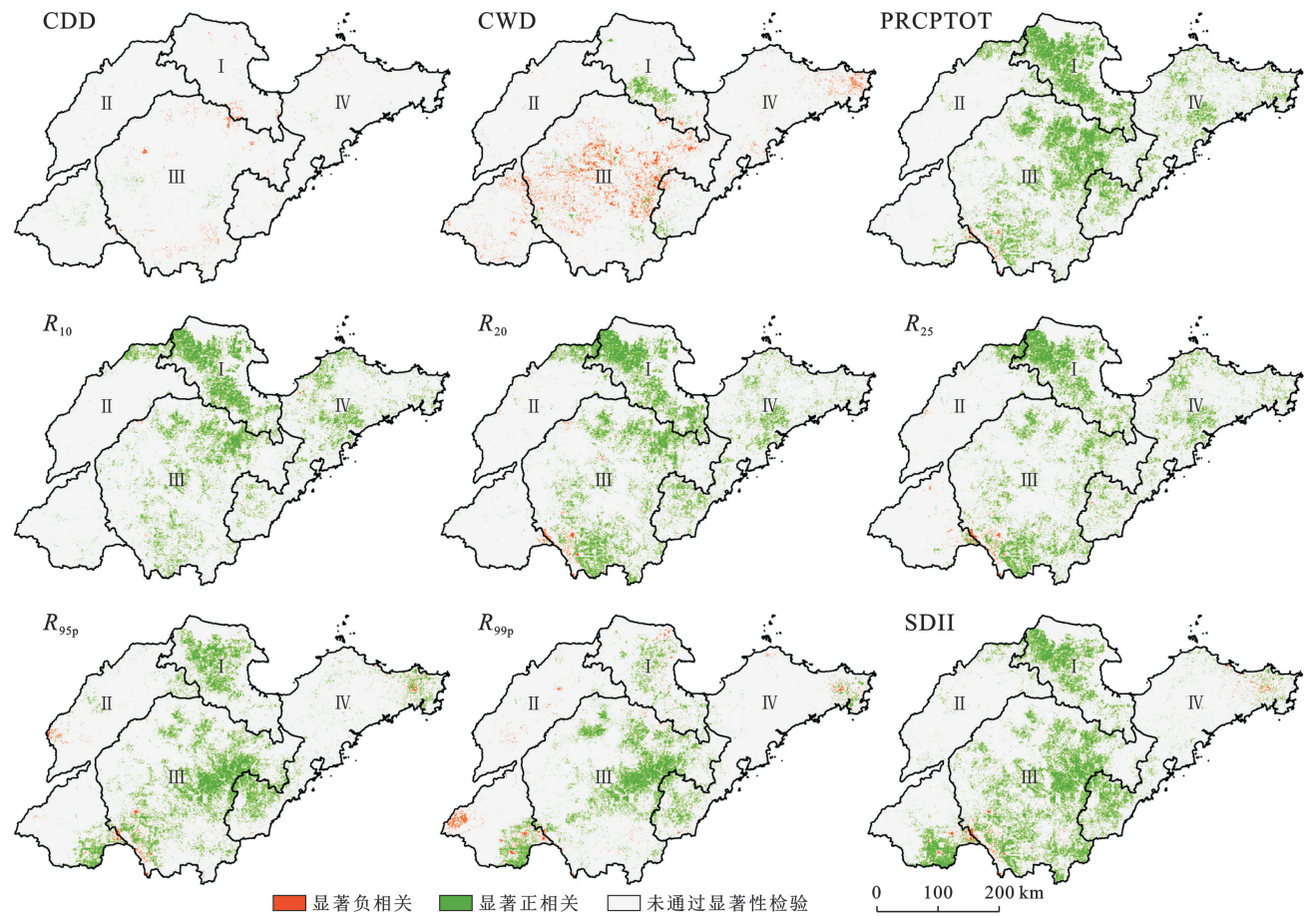


图 5 山东省 1982—2020 年 NDVI 与极端降水年指数的相关性 ($p<0.05$)

Fig.5 Correlation between NDVI and annual indicates of extreme precipitation in Shandong Province during 1982—2020 ($p<0.05$)

图 6 显示的是山东省 NDVI 与各极端降水月指数的相关性。NDVI 与 RX_{1day} , RX_{5day} 主要呈正相关,平均相关系数分别为 0.14,0.13($p<0.01$),且分别有 21.86%,20.08% 的区域呈显著正相关。可以看出,植被对月尺度极端降水的响应比年尺度更为明显。

在空间分布上,NDVI 与 RX_{1day} , RX_{5day} 的显著相关区域主要集中在Ⅱ区南部、Ⅲ区和Ⅳ区,Ⅰ区和Ⅱ区的大部分区域相关性不显著。

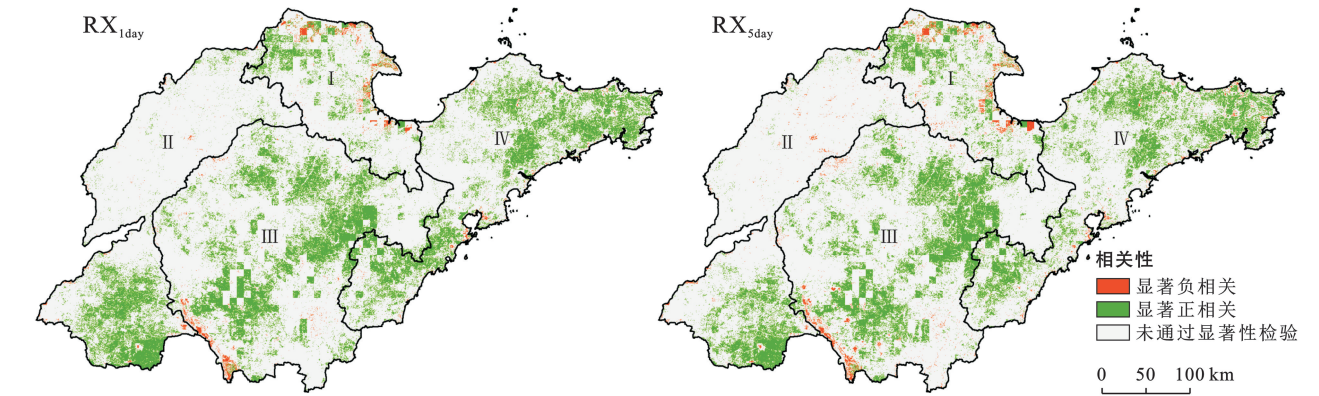


图 6 山东省 1982—2020 年 NDVI 与极端降水月指数的相关性 ($p<0.05$)

Fig.6 Correlation between NDVI and monthly indicates of extreme precipitation in Shandong Province during 1982—2020 ($p<0.05$)

4.3 NDVI 对极端气候响应的滞后性

本文在研究 NDVI 对极端气候的滞后性时选取了同期、NDVI 滞后 1 月、NDVI 滞后 2 月、NDVI 滞后 3 月进行对比,因此只采用极端气候月指数研究 NDVI 的滞后性。图 7 显示,省省及各分区 NDVI 与 DTR, TN_{10p} 和 TX_{10p} 总体呈负相关,与其余指数呈正相关。在极端气温指数中,大部分指数与同期和滞后 1—3 月的 NDVI 均呈显著相关,且与滞后 1—2 月的 NDVI 相关性最强。说明极端气温不仅对同期的植被生长产生影响,其影响可长达数月,且在滞后 1—2

月期间影响最大,NDVI 对极端气温滞后响应明显。另外,一些地区的部分极端气温指数(如全省和 I, III 区的 DTR, IV 区的 T_{max} 等)与同期 NDVI 相关性不显著,而与滞后期 NDVI 显著相关,说明这些指数对同期的植被生长影响不明显,而在滞后期内其影响更为明显。极端降水指数 RX_{1day} 和 RX_{5day} 与 NDVI 大体在同期和滞后 1—2 月显著相关,而与滞后 3 月相关性不显著。表明极端降水主要对同期和滞后 1—2 月的植被生长具有明显的影响,NDVI 对极端降水的响应存在一定的滞后性,但滞后性明显弱于极端气温。

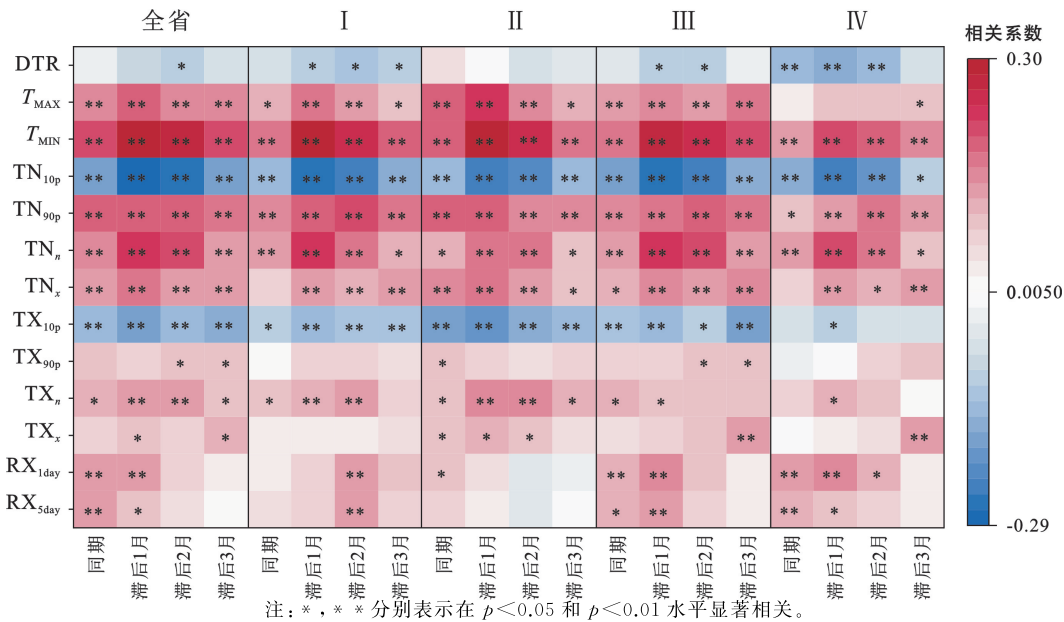


图 7 山东省及各区极端气候月指数与同期、滞后 1—3 月的 NDVI 相关性统计
Fig.7 Correlation coefficients between NDVI and monthly indicates of extreme climate for 1—3 months time lags in Shandong Province and its subregions

5 讨论

5.1 NDVI 时空变化

时间变化上,1982—2021 年山东省 NDVI 总体呈显著上升趋势且未来持续性强,与刘晨曦^[22]、庄会波^[23]关于山东省植被覆盖变化趋势的研究结果基本一致。而 1998—2002 年山东省 NDVI 显著下降,这是由于该时期山东省经历了 4 a 连旱的灾害,造成农业损失严重^[24]。2003 年开始,降水连续偏多,使得植被生产力达到较高的水平^[25],植被 NDVI 逐渐恢复。空间上,山东省 NDVI 总体呈现西高东低、南高北低的分布,具体表现为 II 区最高、I 区最低、III 区和 IV 区适中且差距较小,具有明显的空间异质性,同时以强持续性轻度改善和基本不变为主。鲁西平原区为农业主产区,由于受人为管理的影响,其植被覆盖较好且呈现持续改善的趋势。鲁中南山地丘陵区

鲁东低山丘陵区植被以森林、灌丛和草地为主,植被覆盖适中,且对气候变化的适应能力相对较强,具有较高的稳定性。鲁北平原区北部的渤海湾南岸地区以湿地植被为主,植被覆盖较差,这是由于近海处淡水资源稀少,多盐碱化裸地、盐场、水产养殖区,不利于植被生长^[26]。南四湖地区植被覆盖呈现强持续性严重退化,可能由于 2000 年以来南四湖水位持续上升改变了植被的生存环境,挺水植物被沉水和浮水植物取代,间接导致湖区植被覆盖的降低^[27]。另外全省有部分城市区域植被覆盖持续下降,这主要是由于城市化建设的发展造成的^[28]。

5.2 NDVI 对极端气候的响应

极端气温指数中,暖指数 (SU_{25} , TR_{20} , $WSDI$, T_{max} , TN_x , TX_x , TN_{90p} , TX_{90p}) 与 NDVI 以显著正相关为主,说明气温升高和高温日数增加对植被生长具有一定促进作用。而冷指数中表征低温的指数

(T_{\min} , TN_n , TX_n)与 NDVI 以显著正相关为主,表征低温日数的指数(FD_0 , ID_0 , $CSDI$, TN_{10p} , TX_{10p})与 NDVI 以显著负相关为主,说明极端低温和低温日数的增加使植被难以获得足够的生长积温,对植被生长具有明显的抑制作用^[29]。

极端降水指数与 NDVI 以显著正相关为主,但相较于极端气温指数,极端降水指数总体与 NDVI 的相关性较弱,这说明极端气温对植被的影响比极端降水更明显。另外,在极端气候指数中,月指数与 NDVI 的相关性整体强于年指数,极端气候在短期内对植被的影响程度大于长期,这是因为植被生态系统具有一定的自我调节能力,在极端气候事件发生后,植被在短期受到的影响较大,而在此后的一段时期内植被会向均态的方向调节。

空间上,NDVI 与极端气温相关性多呈均匀分布,而与部分指数的相关性存在空间差异。在Ⅱ区,NDVI 与 ID_0 和 TX_{10p} 的负相关性强,与 T_{\max} , TX_r 的正相关性强。鲁西平原区为山东省粮食主产区,极端低温对农田植被的生长抑制作用以及极端高温对其促进作用明显,说明农田植被对极端气温响应显著。气温日较差 DTR 与 NDVI 在Ⅳ区负相关性强,适度提高 DTR 能够促进光合作用、降低呼吸作用,增加净光合积累,但过大的温差可能会不利于植被的生长发育,甚至产生抑制作用^[30],而沿海通常比内陆温差较低,沿海地区的植被可能对于温差变化的适应性较差,所以沿海地区植被对气温日变化更为敏感。

NDVI 与极端降水的相关性具有明显的空间异质性,但相同时间尺度的指数具有相似的分布特征。NDVI 与年指数正相关性强的地区均主要集中在Ⅰ区和Ⅲ区,鲁北平原区是全省生态环境最脆弱的地区,而鲁中南山地丘陵区多为自然植被,受人为管理的影响较小,植被生长主要受气候变化影响,因此这两个区域的植被受极端降水的影响更为明显。与月指数的正相关性分布情况与山东省的平均降水空间分布(大体由东南向西北递减^[31])较为吻合,因此可能是由于这些地区的植被长期对降水有较强的依赖性,所以其植被对短期的极端降水变化响应明显。

5.3 NDVI 对极端气候的滞后响应

极端气温对同期和滞后 1—3 月的植被生长产生影响,植被覆盖对极端气温存在明显的滞后响应。这可能是由于气温变化对土壤温度以及有机质分解的影响是一个长时间的过程^[32],因此植被生长对气温的反馈有一定延迟。

极端降水对同期和滞后 1—2 月的植被生长具有明显的影响,植被覆盖对极端降水的响应滞后性明

显,但滞后响应时长明显短于极端气温。降水主要通过土壤渗透、植物根系吸收进而被地表植被吸收利用,而山东省植被类型主要以农田植被为主^[28],农田植被根系较浅,因而其吸收利用降水的过程较快,所以植被对极端降水的变化的响应较极端气温更为迅速。

6 结论

(1) 山东省及各分区平均 NDVI 均呈显著上升趋势,全省整体增长速率为 $0.013/10\text{ a}$ ($p < 0.001$),且上升趋势未来持续性强。空间上 NDVI 总体呈现西高东低、南高北低的分布特点,多年均值 NDVI 鲁西平原区(0.47)最高,鲁北平原区(0.35)最低。空间趋势上,全省及各分区植被覆盖以强持续性显著改善和基本不变的趋势为主。

(2) 整体上,NDVI 与极端气温暖指数、极端降水指数以显著正相关为主,与冷指数以显著负相关为主,其他指数中与 GSL 和 DTR 相关性不显著;与极端气温的相关性整体强于极端降水,与月指数的相关性整体强于年指数。空间上,各分区 NDVI 对极端气候的响应具有明显差异:鲁北平原区、鲁中南山地丘陵区、鲁东低山丘陵区 NDVI 对极端气温和极端降水均有明显的响应;鲁西平原区主要受极端气温的影响,而对极端降水的响应不明显。

(3) 极端气温指数大致与同期和滞后 1—3 月的 NDVI 显著相关,极端降水指数大致与同期和滞后 1—2 月的 NDVI 显著相关,说明 NDVI 对极端气温和降水的响应均具有明显的滞后性,且对极端气温的滞后性比对极端降水的滞后性强。

[参 考 文 献]

- [1] Lamchin M, Park T, Lee J Y, et al. Monitoring of vegetation dynamics in the Mongolia using MODIS NDVIs and their relationship to rainfall by natural zone [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2015, 43(2):325-337.
- [2] Jin Kai, Wang Fei, Li Pengfei. Responses of vegetation cover to environmental change in large cities of China [J]. Sustainability, 2018, 10(1):270.
- [3] 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.
- [4] 高滢,孙虎,徐尧尧,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.
- [5] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J].地理学报,2020, 75(5):961-974.

- [6] Zhong Lei, Ma Yaoming, Salama M, et al. Assessment of vegetation dynamics and their response to variations in precipitation and temperature in the Tibetan Plateau [J]. *Climatic Change*, 2010, 103(3): 519-535.
- [7] Jiang Dejuan, Zhang Hua, Zhang Yong, et al. Interannual variability and correlation of vegetation cover and precipitation in Eastern China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 118(1): 93-105.
- [8] Li Chunlan, Wang Jun, Hu Richa, 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.
- [9] Islam A R M T, Islam H T, Shahid S, et al. Spatiotemporal nexus between vegetation change and extreme climatic indices and their possible causes of change [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 289: 112505.
- [10] Luo Min, Sa Chula, Meng Fanhao, et al. Assessing extreme climatic changes on a monthly scale and their implications for vegetation in Central Asia [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 271: 122396.
- [11] Zhang Xuebin, Yang Feng. *RClimDex (1.0) user manual* [M]. Canada: Climate Research Branch Environment, 2004.
- [12] Piao Shilong, Wang Xuhui, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006 [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [13] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近 20 年来中国植被活动在增强[J]. *中国科学(C 辑: 生命科学)*, 2003, 33(6): 554-565, 578-579.
- [14] Hay G, Niernann K, Goodenough D. Spatial thresholds, image-objects, and upscaling: A multiscale evaluation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(1): 1-19.
- [15] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960—2013 年秦岭—淮南北极降水时空变化特征及其影响因素[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(3): 354-363.
- [16] 李常斌, 王帅兵, 杨林山, 等. 1951—2010 年洮河流域水文气象要素变化的时空特征[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1259-1266.
- [17] 王高杰, 黄进良, 肖飞, 等. 基于关联性及趋势性分析的 AVHRR NDVI 及 MODIS NDVI 数据产品比较[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(5): 1143-1151.
- [18] 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): 1-12.
- [19] 吕洋, 董国涛, 杨胜天, 等. 雅鲁藏布江流域 NDVI 时空变化及其与降水和高程的关系[J]. *资源科学*, 2014, 36(3): 603-611.
- [20] 陈彦光. *地理数学方法* [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [21] Van Gelder P H, Mai C V, Wang W, et al. Data management of extreme marine and coastal hydro-meteorological events [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2008, 46(S2): 191-210.
- [22] 刘晨曦, 陈关州, 王铜, 等. 山东省植被覆盖度长时序动态监测与分析[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(4): 585-594.
- [23] 庄会波, 季妤, 高振勇, 等. 1998—2018 年山东省植被覆盖变化及其水文响应规律研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(10): 8-14, 20.
- [24] 张胜平, 陈希村, 苏传宝, 等. 2002 年山东省严重干旱分析[J]. *水文*, 2004(3): 42-45.
- [25] 韩玮, 韩永红, 杨沈斌. 1961—2011 年山东气候资源及气候生产力时空变化特征[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(3): 425-434.
- [26] 路广, 韩美, 徐泽华, 等. 黄河三角洲新生湿地净初级生产力时空变化[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1113-1122.
- [27] 于泉洲, 董杰, 刘恩峰, 等. 基于 MODIS 的南四湖植被覆盖变化的时空特征研究[J]. *林业资源管理*, 2017(1): 144-152.
- [28] 于泉洲, 梁春玲, 刘煜杰, 等. 基于 MODIS 的山东省植被覆盖时空变化及其原因分析[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(11): 1799-1807.
- [29] 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, 275, 341.
- [30] 朱凯. 昼夜温差对设施番茄光合特性及抗氧化酶活性的影响[D]. 江苏 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [31] 任建成, 王峰, 卢晓宁. 基于 EOF 和小波分析的山东省年降水时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 179-183.
- [32] Cui Linli, Shi Jun. Temporal and spatial response of vegetation NDVI to temperature and precipitation in Eastern China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(2): 163-176.