

DOI: 10.20103/j.stxb.202209092577

刘海红, 殷淑燕, 许丽婷, 毛喜玲. 山东省极端气候和人类活动对不同植被类型 NDVI 的影响. 生态学报, 2023, 43(21): 8780-8792.

Liu H H, Yin S Y, Xu L T, Mao X L. Effects of extreme climate and human activities on NDVI (normalized difference vegetation index) of different vegetation types in Shandong Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8780-8792.

山东省极端气候和人类活动对不同植被类型 NDVI 的影响

刘海红, 殷淑燕*, 许丽婷, 毛喜玲

陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

摘要: 山东省作为我国华东典型的沿海地区, 气候多变, 人口密集, 开展极端气候和人类活动对植被的影响对沿海地区生态环境稳定具有重要意义。基于 BRT 模型、多元线性回归方程和残差分析等方法研究了不同植被在极端气候和人类活动干扰下的生长状况。结果显示: (1) 2000—2020 年山东省全区 NDVI (归一化植被指数) 呈增长趋势且具有正持续性 ($H > 0.5$)。空间上, 鲁西北和鲁西南植被生长状况较好且得到了显著改善, 而北部黄河三角洲和莱州湾地区植被覆盖低且得到了显著退化。不同植被类型中草丛植被得到了显著改善 ($P < 0.05$), 而草甸植被退化较为严重; (2) 近年来夜间温度 (TMINmean、TN90p) 的上升, 连续干旱日数 CDD 和瞬时强降雨 RX1d 的增加有利于研究区植被的增长, 而高温极值 TXx 的上升以及霜冻日数 FDO 的减少抑制了植被的增长; (3) 对于不同植被类型, 整体上受到极端气温的影响较大, 且对栽培植物和针叶林的解释度更高, 同一指标对不同植被类型的影响程度和正负效应存在较大的差异; (4) 人类活动在全区植被变化中占主导地位且起到了显著改善作用 ($P < 0.05$)。不同植被类型中草甸受到人类活动的干扰最为明显, 而针叶林则更多受到气候变化的影响。研究结果能对山东省植被未来的管理和规划提供科学支撑, 同时对沿海地区生态环境调控和可持续发展起到了促进作用。

关键词: NDVI; 极端气候; 不同植被类型; 人类活动; 山东省

Effects of extreme climate and human activities on NDVI (normalized difference vegetation index) of different vegetation types in Shandong Province

LIU Haihong, YIN Shuyan*, XU Liting, MAO Xiling

School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: Shandong Province, as a typical coastal area in East China, has a changeable climate and a dense population. The impact of extreme climate and human activities on vegetation is of great significance to the stability of the coastal ecological environment. Based on BRT model, multiple linear regression equation and residual analysis, this paper studies the growth of different vegetation under extreme climate and human activities. The results showed: (1) From 2000 to 2020, NDVI (normalized difference vegetation index) in the whole region of Shandong Province showed an increasing trend and had a positive sustainability ($H > 0.5$). In space, the vegetation growth in the northwest and southwest of Shandong was good and had been significantly improved, while the vegetation coverage in the northern Yellow River Delta and Laizhou Bay was low and had been significantly degraded. Grass vegetation in different vegetation types had been significantly improved ($P < 0.05$), while meadow vegetation degradation was more serious; (2) In recent years, the increase of night time temperature TMINmean (mean daily minimum temperature) and TN90p (number of warm nights), the increase of continuous dry days CDD and instantaneous heavy rainfall RX1d (1-day maximum precipitation) were conducive to the growth of vegetation in

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42071112)

收稿日期: 2022-09-09; 网络出版日期: 2023-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yinshy@snnu.edu.cn

the study area, while the increase of high temperature extreme value TXx and the decrease of frost days FDO inhibited the growth of vegetation; (3) For different vegetation types, the overall impact of extreme temperature was greater, and the interpretation degree of cultivated plants and coniferous forests was higher. The impact degree and positive and negative effects of the same index on different vegetation types were significantly different; (4) Human activities played a leading role in the vegetation change in the whole region and played a significant role in improving it ($P < 0.05$). Among the different vegetation types, meadow vegetation was most affected by human activities, while coniferous forest was more affected by climate change. The research results can provide scientific support for the future management and planning of vegetation in Shandong Province, and promote the regulation and sustainable development of ecological environment in coastal areas.

Key Words: NDVI; extreme climate; different vegetation types; human activity; Shandong Province

近年来,随着气候变化,我国各地极端天气事件愈演愈烈,据中国新闻网报告^[1],今年6月份至7月份我国南方地区多地连日持续高温,“火炉”模式超长待机,浙江、四川、河南等地多人确诊热射病,甚至还出现了死亡病例。因此,极端气候所造成的南极冰盖崩塌、海洋环流突变,森林枯死等自然灾害以及人类生命财产安全已不再是预言,而是真真切切发生在了我们身边^[2-3]。植被连接大气、土壤、水分和生物,它的变化会造成一系列连锁反应,通过其生长状况、时空变化可反映出生态系统的健康状况^[4],不同植被类型由于群落结构、物种组成和根系分布的差异对外界环境的敏感度不同^[5-6],因而造成了景观环境的异质性,尤其在极端事件下,相较于均态性的气候,极端气候事件对不同植被类型造成的影响更为直接和显著。植被生长不仅受到气候等自然因素的影响,也会受到人为干扰的影响,一方面人类活动会通过建立防护林带,围栏封育以及制定相关政策等有效地改善植被,另一方面因过度开垦放牧,修建水电站和发展旅游项目等一系列举措造成植被的退化^[7],因此有必要开展极端气候变化和人类活动对不同植被类型的影响,这有利于全球变化大背景下对植被的长期监测,对不同植被生长影响驱动因子进行全面分析,实现对生态系统的有效管理。

山东省作为我国华东典型的沿海地区,兼备海洋和陆地,位于黄海和渤海之滨,经常受季风的影响,气候变化无常,生态环境脆弱,海洋和陆地气候变化差异明显,而植被在沿海地区生态环境保护中扮演着极其重要的角色。近年来,不少学者对山东省植被生长的驱动因子进行了研究,如郭昱彤等人^[8]分析表明月均温是控制山东省植被覆盖变化的重要因素;马曦瑶等人^[9]研究发现山东省植物 NPP 受水热条件的共同影响,与气温和降水均呈正相关;李卉等^[10]分析得出 2000—2014 年草地植被覆盖度的增加对山东植物 NPP 作出了较大贡献。前人的研究多考虑均态气温、降水以及土地利用类型转变等长期监测指标,而有研究得出近年来山东省极端高温不断增加^[11],春秋两季渤海沿岸易发生温带风暴潮^[12],作为中国重要的商品粮食生产基地之一^[13],这势必会对农作物生长带来一定的影响,且莱州湾由于具有优良的港口,独特的交通区位优势,通常是人口、产业的集中地^[14],近年来城市化进程较快,目前在极端气候事件和人类活动干扰下对植被生长状况的定量评估尚未清楚,因此本文在分析了 2000—2020 年山东省植被 NDVI 指数和极端气候指标演变情况的基础上,基于 BRT 模型筛选出影响植被生长的主要极端气候指标,结合残差分析定量评估气候变化和人类活动对不同植被类型 NDVI 的影响,从而对山东省的植被进行针对性治理和防御保护,为山东省植被未来的管理和规划提供科学支撑,同时对沿海地区生态环境调控和可持续发展起到促进作用,且对黄河下游地区的生态环境治理也有一定的启示作用。

1 研究区概况

山东省地处中国东部,位于北纬 $34^{\circ}22.9'—38^{\circ}24.01'$,东经 $114^{\circ}47.5'—122^{\circ}42.3'$ 之间。属于暖温带季风气候,雨热同期,春秋短暂,冬夏较长,年均温在 $11—14^{\circ}\text{C}$,光照时数年均 $2290—2890\text{h}$,热量条件可满足农作物一年两作的需要。年平均降水量一般在 $550—950\text{mm}$ 之间,由东南向西北递减。降水年际差异大,集中于夏季,易形成涝灾,冬、春及晚秋易发生干旱现象^[11],对农业生产影响大。省内植被主要以农作物为主,多分

布于鲁西北、鲁西南平原区,温带针阔叶混交林、灌丛、草丛等自然植被多分布在鲁中南山地丘陵和胶东半岛丘陵区,沼泽、草甸等湿地植被多分布在北部黄河三角洲以及莱州湾地区^[8,15],如图 1 所示。

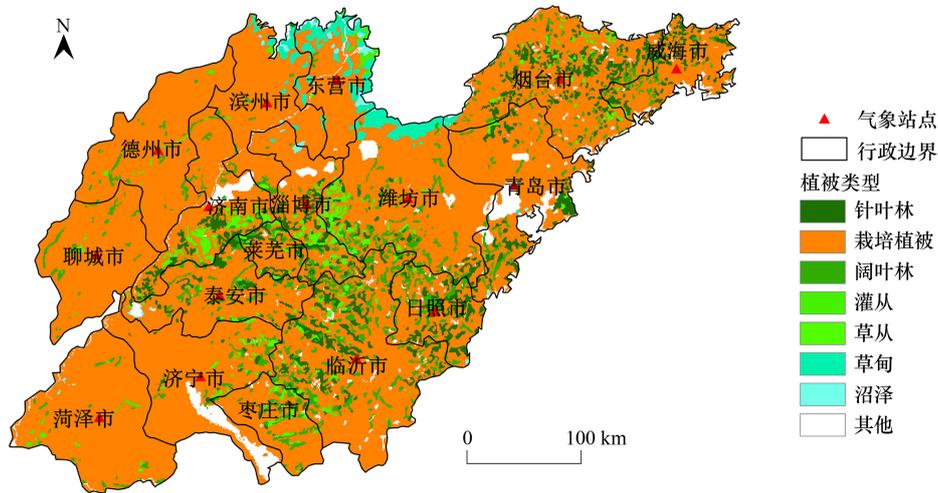


图 1 山东省植被类型分布图

Fig.1 Distribution of vegetation types in Shandong Province

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

NDVI 数据来源于中科院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/DOI>), 获取了 2000—2020 年的月度植被指数, 该空间分布数据集是基于 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据, 时间分辨率为 16d, 空间分辨率为 1km。下载的数据为 ARCGIS GRID 格式, 对数据已进行了大气校正, 去除了云、雾、辐射等干扰。将每年 12 个月的月值数据利用 Arcgis 软件像元统计, 按均值合成法生成各年 NDVI 数据, 数据空间范围覆盖全国, 因此通过掩膜提取出了研究区 21 年的 NDVI 分布图。

中国 1:100 万植被类型数据来源于中科院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/DOI>), 空间分辨率为 1km。按照植被类型一级分类将山东省的植被类型提取出来, 由于研究区内沼泽和灌丛的分布面积较小, 因此将阔叶林、针叶林、草丛、草甸和栽培植物作为本文的主要研究对象。

2000—2020 年的气象数据来源于国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn>), 选取了山东省 21 个气象站点的日最高温、日最低温、日降水量数据。在 RclimDex 软件中计算出了各个站点近 21 年的极端气候指标, 该指标是由 ETCCDMI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) 推荐的, 共 27 项^[16], 研究筛选了符合山东省气候极端态的 8 个气温类指标和 7 个降水类指标^[17]。指标和定义如表 1 所示。

2.2 研究方法

2.2.1 BRT 模型

通过 BRT 模型对所有极端气候指数进行排序, 以便找出对山东省全区植被和不同类型植被影响较大的极端气候指标。BRT 模型结合了传统分类回归树和 Boosting 两大算法, 是一种自主学习的机器算法。它的优点在于对数据具有很大的包容性, 能够忽略自变量之间的共线性关系, 且能对数据的缺失值和重复值进行很好的处理, 以此来获得精确的结果, 现已在植被覆盖变化、城市扩张驱动因子影响分析方面多有研究^[18-20]。为避免空间自相关, 随机抽取研究区 5000 个采样点, 分别将全区的植被指数和不同类型植被指数作为因变量进行赋值, 增加的赋值为 1, 减少的赋值为 -1, 极端气候指标作为自变量在 R Studio 中进行分析, 使用 gbm 软件包, 设置参数决策树的复杂程度为 8, 学习速率为 0.005, 分割比例为 0.5, 其中 50% 的数据用来分析, 另外的

用来训练,进行 5 次交叉验证。

表 1 极端气候指标的定义

Table 1 Definition of extreme climate indicators

项目 Project	指数代码 Index code	极端指数 Extreme index	指标定义 Index definition
降水指标 Precipitation index	SDII	降水强度/(mm/d)	降水量 ≥ 1 mm 的总量与日数之比
	CDD	连续干旱日数/d	最长连续无降水量日数
	CWD	连续湿润日数/d	最长连续降水日数
	RX1d	1 日最大降水量/mm	每月 1 日最大降水量
	PRCPTOT	年湿日数降水总量/mm	每年日降水量 ≥ 1 mm 降水量之和
	R95p	强降雨量/mm	日降水量 $>$ 基准期内 95% 分位数的降水量之和
	R25	暴雨日数/d	日降水量 ≥ 25 mm 的日数
	气温指数 Temperature index	TX10p	冷昼日数/d
气温指数 Temperature index	TN90p	暖夜日数/d	日最低气温 $>$ 90% 分位数的日数
	TNn	日最低气温的极低值/ $^{\circ}\text{C}$	每月内日最低气温的最小值
	TXx	日最高气温的极高值/ $^{\circ}\text{C}$	每月内日最高气温的最大值
	FDO	霜冻日数/d	每年日最低气温 $<$ 0 $^{\circ}\text{C}$ 的日数
	CSDI	冷持续指数/d	连续 6 日最低气温在 10% 分位值的日数
	TMAXmean	最高气温/ $^{\circ}\text{C}$	日最高气温的平均值
	TMINmean	最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	日最低气温的平均值

2.2.2 Hurst 指数

本研究采用 Hurst 指数^[21]来预测未来山东省全区植被以及不同植被类型的 NDVI 生长趋势的可持续性。运用 R/S 分析法计算出 H 值,当 $H=0.5$ 时,表明序列之间相互独立,具有随机性,不存在长期相关性;当 $0.5 < H < 1$ 时,表明该序列具有长期依赖型,表现为正向持续性,即 NDVI 未来变化与过去的变化趋势一致,且 H 值越大,持续性越强;反之当 $0 < H < 0.5$ 时,表现为反向持续性,即未来的 NDVI 变化趋势与过去相反,且 H 值越接近于 0,反持续性越强。

2.2.3 多元线性回归

在构建不同类型植被与极端气候的关系模型时,采用经典的统计模型多元线性回归方程,本文将不同类型植被 NDVI 作为因变量,与其对应的主要极端气候指标为自变量进行线性依存关系的检验。多元线性回归模型以定量的方式显示了控制其他因素后单一因素对因变量的影响^[22-23],能更加具体地分析出不同极端气候指标对不同植被类型 NDVI 的作用程度。最后用 R^2 值选择出最佳回归模型。

2.2.4 残差分析和情景模拟评估方法

研究气候变化和人类活动对植被 NDVI 的相对贡献率时采用了残差分析和情景模拟评估相结合的方法。残差分析^[24]是基于通过建立植被指数与气候指标的多元线性回归方程,得到 NDVI 预测值($NDVI_p$),即气候对植被的影响,由于考虑到植被覆盖变化不仅受到极端气候的影响,还会受到气候的长期变化,因此为了结果的精确性,将研究区年均温、年降水数据以及极端气候指标同时作为气候指标因素构建模型;接着将 NDVI 实测值(气候和人类活动的综合作用)减去 $NDVI_p$ 得到的残差值 $NDVI_h$,视为人类活动对植被的影响。公式如下:

$$NDVI_p = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n + \mu \quad (1)$$

$$NDVI_h = NDVI - NDVI_p \quad (2)$$

式中, n 为气候指标的数量, b_0 为常数项, X_i 为气候指标, $b_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为回归系数。

情景模拟评估方法^[25]是通过 NDVI 实测值以及得出的 $NDVI_p$ 和 $NDVI_h$ 分别计算出它们的变化率(slope、 $slope_p$ 、 $slope_h$),以此来分别构建出气候变化和人类活动在植被改善和植被退化中的相对贡献率。本文参照耿

庆玲等人^[26]的情景模型评估如表 2 所示。 $\text{slope}>0$ 表示植被改善,反之则为退化; $\text{slope}_p>0$ 表示气候变化促进植被改善,反之则抑制植被增长; $\text{slope}_h>0$ 则表示人类活动促进植被改善,反之则抑制植被改善。

表 2 不同情景下极端气候和人类活动对植被变化贡献度的计算

Table 2 Calculation of contribution degree of extreme climate and human activities to vegetation change under different scenarios

植被变化趋势 Vegetation change trend	情景模式 Profile	slope	slope_p	slope_h	气候指标的贡献率 Contribution rate of climate/%	人类活动的贡献率 Contribution rate of human activities/%
植被改善区 Vegetation improvement area	情景 1	>0	<0	>0	0	100
	情景 2	>0	>0	<0	100	0
	情景 3	>0	>0	>0	$\frac{\text{slope}_p}{\text{slope}_p+\text{slope}_h}$	$\frac{\text{slope}_h}{\text{slope}_p+\text{slope}_h}$
植被退化区 Degraded vegetation area	情景 4	<0	<0	>0	100	0
	情景 5	<0	>0	<0	0	100
	情景 6	<0	<0	<0	$\frac{\text{slope}_p}{\text{slope}_p+\text{slope}_h}$	$\frac{\text{slope}_h}{\text{slope}_p+\text{slope}_h}$

3 结果与分析

3.1 NDVI 的时空分布特征

3.1.1 NDVI 的时间分布特征

2000—2020 年山东省植被 NDVI 以 0.002/a 的速率呈极显著增长 ($P<0.01$), 如图 2 所示, 最大值出现在 2017 年, 为 0.45; 最小值为 2002 年, 为 0.38, 据资料显示^[27], 这一年山东省鲁西北、鲁西南、黄河故道等平原区旱情严重, 使得农作物大量减产甚至绝收, 造成了严重的农业灾害, 因此植被覆盖度较低。全区植被 Hurst 指数为 0.89 (>0.5), 说明未来研究区的植被指数呈强持续性增长趋势。不同类型植被 NDVI 变化趋势与全区植被相一致, 如表 3 所示: 除了草甸植被未能通过显著性检验以外, 所有类型的植被指数都呈极显著增长趋势 ($P<0.01$), 其中草丛植被增长速率最快, 为 0.004/a。研究显示所有植被的 Hurst 指数都大于 0.5, 说明未来不同植被类型的 NDVI 将会持续增长, 且草丛和栽培植物的持续性最强。

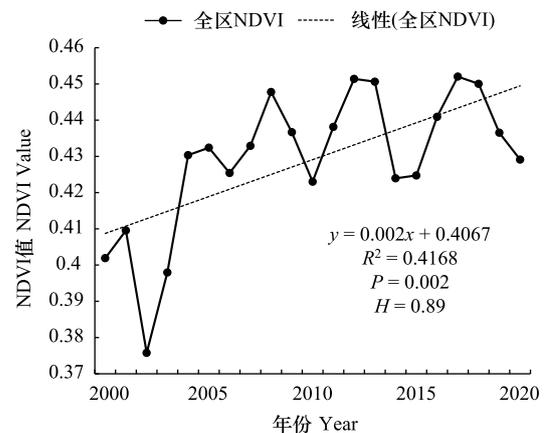


图 2 山东省植被 NDVI 变化趋势

Fig. 2 NDVI change trend of vegetation in Shandong Province

表 3 山东省不同类型植被变化趋势

Table 3 Change trend of different types of vegetation in Shandong Province

植被类型 Vegetation type	回归方程 Regression equation	R^2	P	H
针叶林 Coniferous forest	$y=0.003x+0.397$	0.548	0.0001	0.89
阔叶林 Broad-leaved forest	$y=0.002x+0.400$	0.428	0.001	0.88
草甸 Water meadow	$y=0.0002x+0.308$	0.023	0.512	0.87
草丛 Thick growth of grass	$y=0.004x+0.384$	0.617	0.0002	0.90
栽培 Cultivated crops	$y=0.002x+0.418$	0.400	0.002	0.90

R^2 : 拟合系数 Coefficient of determination; H : 赫斯特指数 Hurst exponent

3.1.2 NDVI 的空间分布特征

2000—2020 年山东省全区的 NDVI 均值为 0.429, 不同类型植被 NDVI 有所差异, 栽培植物 (0.441) > 针叶

林(0.427)>阔叶林(0.425)>草丛(0.424)>草甸(0.202)。其中栽培作物的 NDVI 值最大,说明栽培作物对全区植被的 NDVI 贡献度较高。根据研究区近年来的植被分布情况^[28],将 NDVI 值分为三个等级,<0.3 为低值区,0.3—0.6 为中值区,>0.6 为高值区,如图 3 所示:研究区内 NDVI 分布主要以中值区为主,其面积占比为 50.71%,其次为高值区,占比为 42.95%,主要分布在鲁西北的德州、聊城以及鲁西南的菏泽和济宁地区,而低值区面积占比较小,仅为 6.34%,主要分布在北部黄河三角洲和莱州湾地区。空间变化趋势表现为增加的面积(74.55%)大于减少的面积(25.45%),且显著增加的面积占比达到了 61.28%,因此大多数区域植被都得到了显著改善($P<0.05$),显著退化的面积占比为 20.11%,多分布在莱州湾以及威海、日照、临沂等沿海城市。从不同植被类型来看,研究区 5 种植被类型的生长状况都是改善的面积大于退化的面积,如图 4,其中草丛植被显著改善的面积分布最广,达到了 86.44%,针叶林、阔叶林、栽培作物显著改善的占比相当,分别为 66.99%、61.14%、63.25%。植被退化中,草甸植被的退化面积最大,为 30.81%。

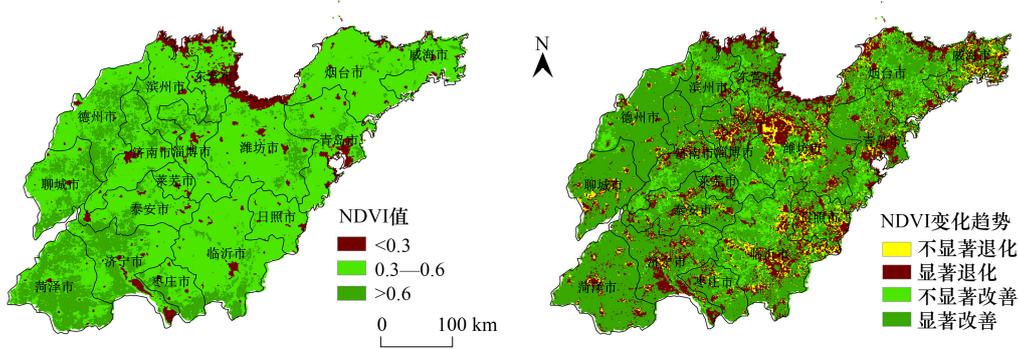


图 3 2000—2020 年山东省植被 NDVI 空间分布及变化趋势

Fig.3 Spatial distribution and change trend of NDVI of vegetation in Shandong Province from 2000 to 2020

3.2 极端气候指标的变化趋势

2000—2020 年山东省极端气候指标变化趋势如表 4 所示:表征冷指标的 FDO (霜冻日数)、CSDI (冷持续日数)、TX10p (冷昼日数)呈下降趋势,且 TX10p 下降趋势最快也最为明显 ($P < 0.05$);而温度极值 TMAXmean (最高气温)、TMINmean (最低气温)、TNn (日最低气温极低值)、TXx (日最高气温极高值)以及表征暖指标的 TN90p (暖夜日数)都呈增加趋势, TMAXmean 的增加最为明显 ($P < 0.05$)。Hurst 指数显示除了 CSDI 和 TXx 的变化趋势与过去 21 年变化相反以外 ($H < 0.5$),其余指数都与过去相一致 ($H > 0.5$),表明未来山东省极端温度会持续上升。降水指标中 CDD (连续干旱日数)呈增加趋势,CWD (连续湿润日数)呈减小趋势,降水强度和频率指标都呈上升趋势,R95p (强降雨量)和 RX1d (1 日最大降雨量)的增加速率最快,分别为 1.777mm/a 和 1.362mm/a,年湿日数降水总量 PRCPTOT 增加显著 ($P < 0.05$)。所有指标的 Hurst 指数都大于 0.5,说明未来山东省由于极端温度的上升使得干旱风险增加,但区域内瞬时强降雨量和频率都在增加,因此未来要注意暴雨、洪涝等地质灾害的发生。

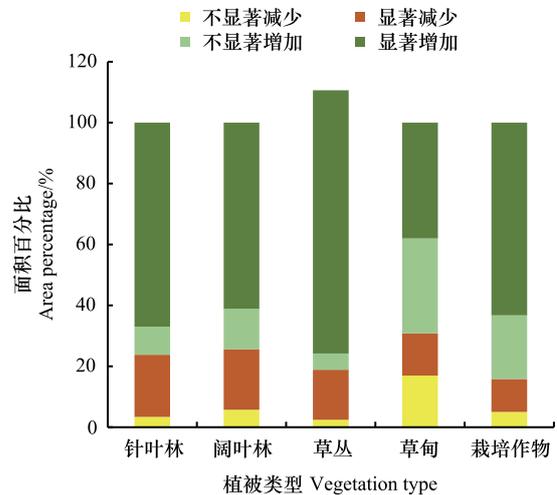


图 4 山东省不同植被类型的空间变化趋势

Fig.4 Spatial variation trend of different vegetation types in Shandong Province

表 4 2000—2020 年山东省极端气候指标的变化趋势

Table 4 Change trend of extreme climate indicators in Shandong Province from 2000 to 2020

极端气候指标 Extreme climate indicators	回归方程 Regression equation	R^2	P	H
FDO	$y = -0.102x + 91.029$	0.005	0.761	0.66
CSDI	$y = -0.041x + 1.048$	0.052	0.332	0.44
TMAXmean	$y = 0.048x + 17.910$	0.267	0.020	0.70
TMINmean	$y = 0.026x + 8.881$	0.155	0.086	0.73
TN90p	$y = 0.298x + 15.027$	0.167	0.074	0.70
TX10p	$y = -0.318x + 15.433$	0.230	0.032	0.72
TNn	$y = 0.045x - 13.182$	0.019	0.567	0.52
TXx	$y = 0.007x + 36.620$	0.002	0.867	0.31
SDII	$y = 0.057x + 12.066$	0.049	0.350	0.72
CDD	$y = 0.497x + 46.013$	0.040	0.397	0.72
CWD	$y = -0.015x + 4.433$	0.015	0.605	0.54
R25	$y = -0.051x + 7.955$	0.019	0.561	0.81
R95p	$y = 1.777x + 44.121$	0.095	0.185	0.59
PRCPTOT	$y = 0.308x + 157.385$	0.218	0.038	0.73
RX1d	$y = 1.362x + 74.769$	0.158	0.083	0.69

3.3 极端气候对植被 NDVI 的贡献度

由 BRT 模型分析得出结果,如图 5 所示,我们选择贡献率排名前 5 的极端气候指标可知,对于山东省全区植被来说,FDO、CDD、RX1d、TMINmean、TXx 的贡献率较高,分别为 11.50%、7.97%、7.86%、7.61%、7.27%,受到温度和降水类指标的共同影响。对于不同植被类型,阔叶林中 TNn、TMINmean、TN90p、CSDI、TMAXmean 的贡献度较高,贡献率都大于 6%;草丛中 TNn、FDO、CDD、TN90p、TX10p 的贡献较高,其贡献率都大于 10%;草甸植被中 CSDI、FDO、TN90p、CDD 和 TNn 的贡献率较高,贡献率都大于 8%;针叶林主要受到 TX10p、TN90p、FDO、TMINmean、TXx 的影响,贡献率都大于 7%;而栽培作物主要受到 TXx、CDD、FDO、TX10p、TN90p 的影响,贡献率都大于 10%。因此结果显示虽然极端气候对不同类型植被的贡献度不同,但总体来说温度类指标的贡献率比降水要高。

3.4 极端气候对 NDVI 的影响

3.4.1 极端气候对全区植被 NDVI 的影响

将 BRT 模型筛选出的主要极端气候指标与山东省全区植被指数作空间相关性分析得出图 6:植被指数与高温极值 TXx 的相关系数均值为-0.143,在研究区内主要以负相关为主,面积占比达到了 75.23%,说明高温极值的升高对研究区植被生长产生了消极效应;而与 TMINmean 的相关系数均值为 0.018,介于-0.960—0.874,显著性较强,面积占比为 19.39%,说明近年来低温极值的升高显著改善了大部分地区植被的生长。与 FDO 的相关系数均值为 0.102,以正相关为主,正相关面积占比为 67.44%,近年来研究区 FDO 减少较为迅速(-0.102d/a),因此 FDO 的减少抑制了研究区植被的生长;与 CDD 的相关系数均值为 0.053,以正相关为主,但相关性不显著;与 RX1d 的相关系数均值为 0.162,其值介于-0.801—0.825,在研究区内正相关面积占比为 74.96%,说明瞬时强降雨的增加有利于研究区植被的生长。

3.4.2 极端气候对不同类型植被 NDVI 的影响

对于不同植被类型,建立与之相对应的极端气候指标线性回归模型,结果如表 5 所示:针叶林和栽培作物的解释力相对较高, R^2 都大于 0.4,其次为阔叶林和草甸, R^2 都大于 0.3,草丛的解释力度最弱,其 R^2 为 0.264。暖夜日数 TN90p 与所有类型植被指数的相关性都为正,说明夜间温度的上升对所有植被类型生长都会起到改善作用,其中对针叶林和栽培作物的影响更大,意味着 TN90p 每增加一天,NDVI 值分别增加 0.003 和 0.002;FDO 与针叶林、草甸、草丛以及栽培作物都呈正相关,与针叶林的相关性更强(速率为 0.003/d),因此

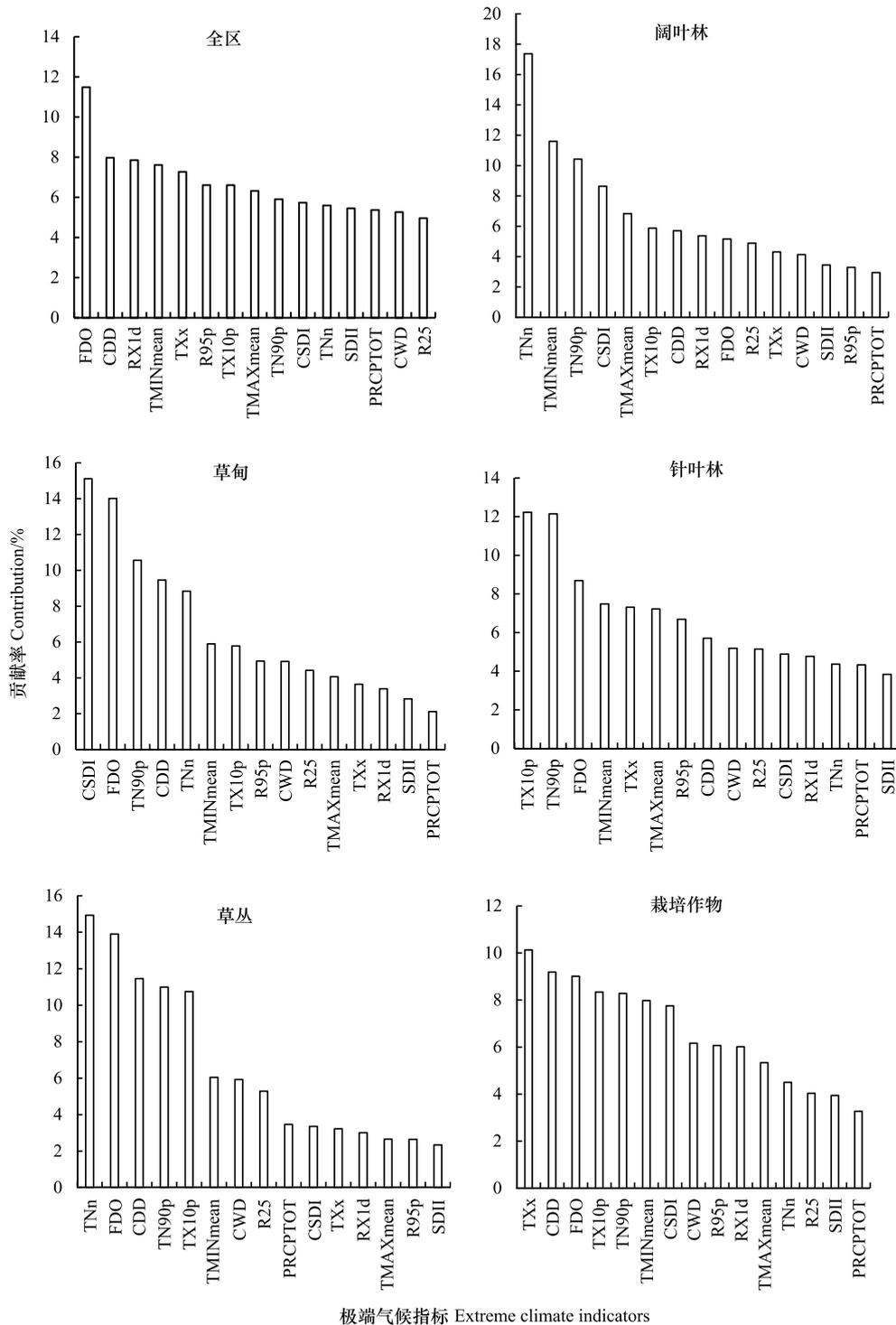


图5 极端气候指标对全区植被及不同类型植被的贡献度

Fig.5 Contribution of extreme climate indicators to the vegetation of the whole area and different types of vegetation

FDO: 霜冻日数; CSDI: 冷持续指数; TMAXmean: 最高气温; TMINmean: 最低气温; TN90p: 暖夜日数; TX10p: 冷昼日数; TNn: 日最低气温的极低值; TXx: 日最高气温的极高值; SDII: 降水强度; CDD: 连续干旱日数; CWD: 连续湿润日数; R25: 暴雨日数; R95p: 强降雨量; PRCPTOT: 年降水量; RX1d: 1日最大降水量

近年来 FDO 的显著减少对针叶林的抑制最为明显;TXx 的升高则会抑制栽培作物和针叶林的生长,其中对针叶林的抑制作用更大(其减小速率为 0.01/℃);冷持续指数 CSDI 的增加会抑制阔叶林和草甸植被的生长且对阔叶林的影响更为明显(其减小速率为 0.014/℃);连续干旱日数 CDD 与草丛、草甸、栽培作物都呈正相关,但其促进作用较弱(增速都<0.001);冷昼日数 TX10p 与针叶林呈正相关,但与草丛和栽培作物呈负相关;日最低气温极低值 TNn 与阔叶林和草丛呈正相关,而与草甸却呈负相关;最低气温均值 TMINmean 与针叶林呈正相关,与阔叶林呈负相关,说明同一指标对不同类型植被的影响程度和正负效应都存在较大的差异。

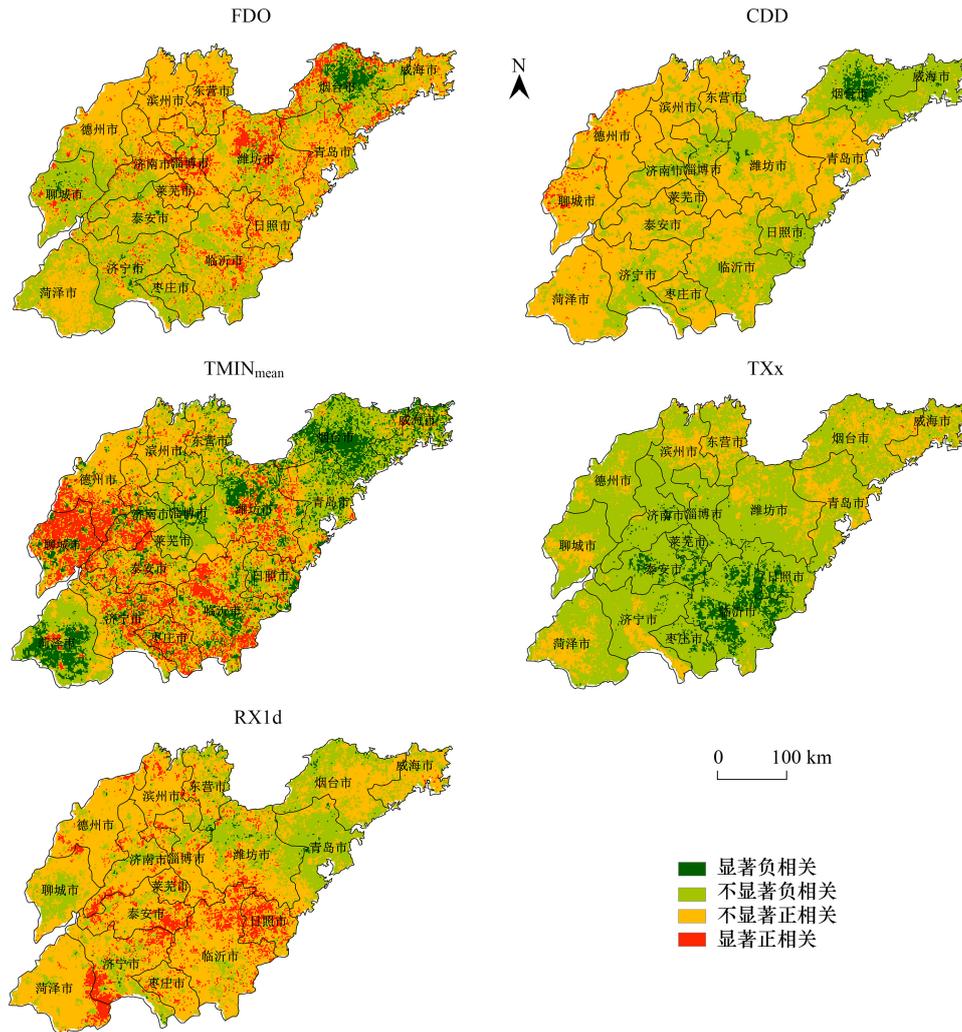


图 6 2000—2020 年山东省植被 NDVI 与极端气候指标相关性的空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of correlation between NDVI of vegetation and extreme climate indicators in Shandong Province from 2000 to 2020

表 5 不同类型植被与极端气候指标的多元线性回归方程

Table 5 Multiple linear regression equations of different types of vegetation and extreme climate indicators

植被种类 Vegetation type	多元线性回归方程 Multiple linear regression equation	R ²
针叶林 Coniferous forest	$y = 0.013 + 0.003TN_{90p} + 0.001TX_{10p} + 0.048TMIN_{mean} - 0.01TX_x + 0.003FDO$	0.410
阔叶林 Broad-leaved forest	$y = 0.528 + 0.001TN_n - 0.055TMIN_{mean} + 0.003TN_{90p} - 0.014CSDI + 0.02TMAX_{mean}$	0.343
草甸 Water meadow	$y = 0.096 + 0.001TN_{90p} - 0.003CSDI + 0.001FDO - 0.001TN_n + 0.000056CDD$	0.336
草丛 Thick growth of grass	$y = 0.250 + 0.001TN_n + 0.003TN_{90p} + 0.002FDO + 0.000266CDD - 0.002TX_{10p}$	0.264
栽培 Cultivated crops	$y = 0.552 + 0.002TN_{90p} + 0.002FDO - 0.002TX_{10p} - 0.008TX_x + 0.000246CDD$	0.456

3.5 气候变化和人类活动对植被 NDVI 的贡献度分析

2000—2020 年山东省气候变化和人类活动对植被变化的贡献度如图 7 所示,在植被退化区,全区植被受到气候变化与人类活动的贡献率分别为 37.71% 和 62.29%,其中草甸植被的退化受到人类活动的干扰最为严重,其贡献率达到了 96.66%,其次为栽培作物,其贡献率达到了 88.82%,而针叶林的退化则更多是由气候变化造成的,其贡献率为 60.40%。在植被改善区,对于全区植被,气候变化和人类活动的贡献率分别为 36.76% 和 63.24%。不同类型植被中人类活动的贡献率从大到小依次为:草甸(85.07%)>阔叶林(79.47%)>栽培植物(72.52%)>草丛(69.44%)>针叶林(41.96%)。同样,草甸植被的改善与人类活动的干扰最为密切,而对针叶林的影响最弱。整体来说,大多数植被变化都受到人类活动的干扰,其中对草甸植被的干扰最强烈,而针叶林则更多受到气候变化的影响。为进一步分析人类活动对区域内的影响差异,进行了空间分析,如图 8 所示,人类活动导致植被增加和减少的面积分别为 65.40% 和 31.40%,且研究区整体以显著性增加为主($P < 0.05$),其面积占比达到了 53.99%,说明近 21 年来人类活动的干扰对山东省植被变化起到了显著改善作用,起显著退化作用的地区同 NDVI 低值区和退化区一样,多分布于海湾沿岸城市。

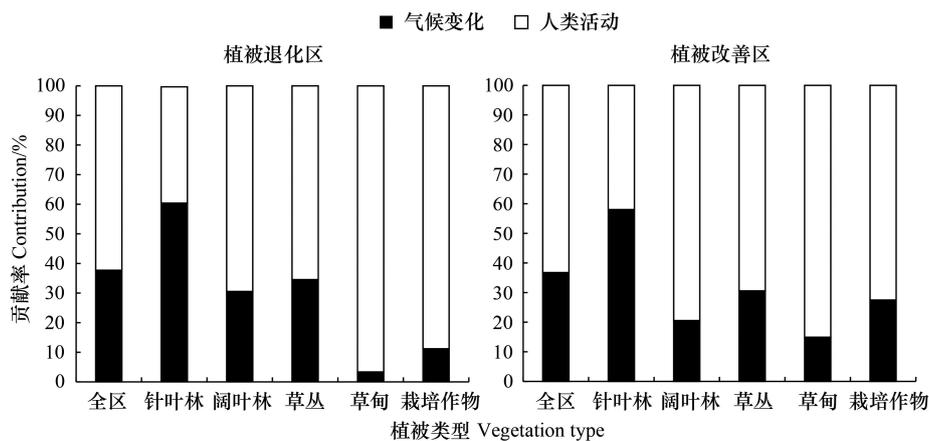


图 7 人类活动和气候变化对植被的贡献度

Fig.7 Contribution of human activities and climate change to vegetation

4 讨论

2000—2020 年山东省植被得到了极显著改善($P < 0.05$),且未来植被将会持续增长,这与王晓利等人研究的结果相一致^[29],究其原因,植被的增长与区域气候的变化息息相关,山东省属于暖温带季风气候,夏季太阳高度角大,光照时数年均 2457h,且不同植被类型的光能利用率高,同时也有从热带海洋吹来的东南季风带来大量的降水,优渥的水热条件使得山东省的植被普遍长势较好^[13]。除了自然因子,本研究表明人类活动对山东省植被起到了显著改善作用,一方面,这与国家自 1988 年来批准的《全国沿海防护林体系建设总体规划》政策紧密相关,经过这几十年一二三期工程项目的实施,我国沿海地区的森林资源总量持续上升,沿海防护林的生态功能逐渐增强^[30];另一方面山东省作为我国主要的粮食产区之一,全区内栽培作物分布广泛,因此

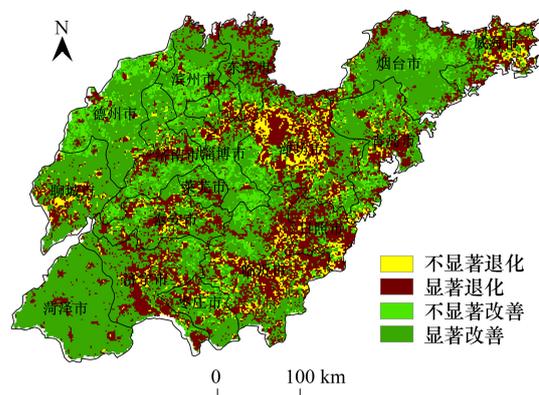


图 8 人类活动对研究区植被变化的影响

Fig.8 Impact of human activities on vegetation changes in the study area

对耕地增加化肥施用量提高了单位面积粮食产量^[31],并且近年来高标准农田建设项目的实施以及农业综合管理水平的提高为植被的增长做出了较大的贡献。

研究显示,植被空间分布特征与变化趋势较为一致,NDVI 高值区主要分布在鲁西北的德州和聊城以及鲁南的菏泽和济宁地区,并且都得到了显著改善($P<0.05$),这些地区城市化进程慢,受人类活动干扰较少,且菏泽和济宁作为山东省粮食主产区,栽培作物的 NDVI 值较高,因此对区域植被的 NDVI 值贡献度较高;而低值区和显著退化区则集中分布在北部黄河三角洲的滨州,莱州湾地区的东营、潍坊、烟台等靠近沿海的城市,首先,这可能是由于这些地区经常受到海水倒灌的影响,土壤盐渍化严重,因此不利于植被的生长;其次,或许是因为多分布于 NDVI 值较低的草甸植被,本研究时段内山东省草甸植被增长最慢,退化面积较大,而人类活动在草甸退化中的干扰较为严重,近年来莱州湾海岸带人口规模不断扩大,人类对资源的开发利用、滨海养殖以及港口与航道的建设使得人工岸线增长^[32],沿岸的自然生态系统遭到了严重的破坏,因此未来对沿岸地区要规范人类活动,合理配置资源,制定长期的生态环境保护措施。

关于极端气候对研究区植被的影响研究发现,相较于极端降水,极端温度对不同植被类型的敏感度更高,一方面可能是由于山东省多分布于栽培植物,农业用水主要来源于人工灌溉,而对于自然植被则更多来源于河流以及南水北调东线工程的补给,因此自然降水对其影响较小;另一方面,山东省位于半湿润区,山东半岛沿海地区常年降水量较为丰富,能满足植被生长所需要的水分,所以在一定程度上温度成了植被生长的关键影响因素^[33]。研究区植被 NDVI 与暖夜日数 TN90p 和最低气温均值 TMINmean 都呈正相关,说明近年来山东省夜间变暖,积温充足,日最低气温的上升增加了土壤的温度,从而使得植物的固碳能力和呼吸作用加强,有利于植被增长^[34];而高温极值 TXx 在鲁中南的泰安市、临沂市和日照市呈显著负相关,可能是由于这些地区降水相对丰富,植被生长适宜了湿润环境,气温升高,便会加剧土壤水分的蒸发和植被呼吸作用^[35],植物养分分解过快,叶片寿命缩短,反而不利于植被的生长。霜冻日数 FDO 与研究区大多数植被都呈正相关,其一,这可能是由于近年来山东省暖指数和极端气温都在急剧上升,偏于暖干趋势,而 FDO 在迅速地减少,因此适当霜冻日数的出现有利于土壤保持水分,减少蒸散发,反而有利于植被生长;其二,霜冻日数的减少对针叶林的抑制作用最强,对于温带地区的大多数木本植被来说,植被展叶期受到积温和冷激的共同影响^[36],植物在春季变绿前需要受到低温刺激,而研究表明,冷激量的减少会使得植物展叶所需的积温总量增加,意味着植物需要更长时间才能达到积温,如 Melke 等人^[37]表明在低纬的亚热带地区温度升高导致的冷激量不足是限制植物展叶的关键;温智虹等人^[38]也发现霜冻天数的减少和霜冻强度的减弱减缓了大兴安岭草原生态系统植被变绿的速率,而近年来山东省霜冻日数急剧下降,冬季趋于变暖,冷激不足延迟了植物的展叶期,因此生长较为缓慢。研究显示,植被退化区,相较于人类活动,极端气候指标对针叶林的贡献率较高,即 TXx 和 FDO 的变化对针叶林的影响最大,因此近年来针叶林的显著退化可能与 TXx 的增加和 FDO 的显著减少有关。连续干旱日数 CDD 与植被 NDVI 在大多数地区都呈正相关,这与岳祝等人^[12]研究东部沿海地区的结果相一致,这可能是由于沿海地区的干旱日数一般发生在冬春季节,尤其在华东和东北沿海城市,相较于华南地区温度较低,因此干旱日数的增加缓解了气温的持续降低,减少了冰冻灾害,反而维持了植被的生长。

5 结论

本文分析了 2000—2020 年山东省植被的分布及生长状况,并基于 BRT 模型和多元线性回归模型分析了极端气候指标对全区植被和不同类型植被的影响,在此基础上也进一步明确了气候变化和人类活动对植被的贡献度,研究结果如下:

(1) 2000—2020 年山东省所有植被 NDVI 都呈增长趋势, Hurst 值都 >0.5 ,表明未来植被将处于持续增长状态,其中草丛的增长速度最快且持续性更强。空间上,鲁西北和鲁西南植被生长状况较好且得到了显著改善,而北部黄河三角洲和莱州湾等沿海城市植被覆盖度低且得到了显著退化。不同植被类型区中,草丛得到了显著改善,而草甸却得到了显著退化($P<0.05$)。

(2)近 21 年来山东省全区植被主要受到霜冻日数 FDO、连续干旱日数 CDD、瞬时强降雨量 RX1d、低温极值 TMINmean、高温极值 TXx 的影响,其中与 TXx 主要以负相关为主,与其余指数都呈正相关。

(3)对于不同类型植被,主要受到极端温度的影响。研究表明,极端气候变化对针叶林和栽培作物的影响最为敏感,且同一指标对不同类型植被的影响程度和正负效应有很大的差异。

(4)近年来山东省全区植被变化主要受到人类活动的干扰且人类活动对大多数地区的植被都起到了显著改善作用($P<0.05$)。对于不同植被类型,草甸植被受到人类活动干扰最为明显,而针叶林的退化则更多受到气候变化的影响。

参考文献(References):

- [1] 北晚在线.热射病出现死亡病例!持续高温影响全国超9亿人!还要热多久.中国新闻网.2022.[2023-01-14].
- [2] 王昊.西南地区极端气候指数时空变化及其对 NDVI 的影响特征研究[D].北京:北京林业大学,2019.
- [3] 吴珊珊,姚治君,姜丽光,王蕊,刘兆飞.基于 MODIS 的长江源植被 NPP 时空变化特征及其水文效应.自然资源学报,2016,31(1): 39-51.
- [4] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature, 2003, 421(6918): 37-42.
- [5] 刘静,温仲明,刚成诚.黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应.生态学报,2020,40(2): 678-691.
- [6] 任蔓莉,魏晨辉,裴忠雪,路嘉丽,王琼,王文杰,祖元刚.松嫩平原沙土区不同植被类型对土壤相关指标的影响.植物研究,2015,35(5): 765-771.
- [7] 杨安乐,张小平,李宗省,李玉辰,南富森.气候变化和人类活动对祁连山国家公园植被净初级生产力的定量影响分析.生态学报,2023(05):1-9.
- [8] 郭显彤.基于 MODIS 影像的山东省植被覆盖时空变化研究[D].济南:山东师范大学,2017.
- [9] 马曦瑶.山东省植被净初级生产力时空分布特征及其影响因子研究[D].北京:北京林业大学,2019.
- [10] 李卉,张安定,侯西勇.2000—2014 年山东省植被净初级生产力对土地覆盖变化的响应.鲁东大学学报:自然科学版,2019,35(2): 157-163, 192.
- [11] 刘玄,唐培军,吴同师,冯忠伦,刁艳芳,王刚.山东省极端气候指数变化特征研究.水利水运工程学报,2022(2): 40-50.
- [12] 岳祝.中国大陆沿海地区极端气温和降水时空趋势及其对植被生长的影响[D].上海:华东师范大学,2019.
- [13] 张筠.基于 CASA 模型的山东省植被 NPP 时空格局变化及其驱动因素研究[D].烟台:鲁东大学,2021.
- [14] 杨桂山.中国海岸环境变化及其区域响应[D].南京:中国科学院研究生院(南京地理与湖泊研究所),2001.
- [15] 初建朋,姚云军.基于 ArcGIS 的山东省植被空间格局.山东理工大学学报:自然科学版,2010,24(6): 15-18.
- [16] Xuebin Zhang, Yang Feng. RCLimDex(1.0), User Manual. Climate Research Branch, Environment Canada. 2004. [2023-01-14]
- [17] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, Gleason B, Haylock M, Klein Tank A, Peterson T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Climate Research, 2002, 19: 193-212.
- [18] 刘焱焱,曾鹏,张然,孙风云,车越.基于 GEE 和 BRT 的 1984—2019 年长三角生态绿色一体化发展示范区植被覆盖度变化.应用生态学报,2021,32(3): 1033-1044.
- [19] 尤昆明,刘士余,聂小飞,胡小丹,郑海金.基于增强回归树的红壤旱坡花生地气态氮损失影响因素分析.生态与农村环境学报,2021,37(5): 651-660.
- [20] Sun F Y, Liu M, Wang Y C, Wang H, Che Y. The effects of 3D architectural patterns on the urban surface temperature at a neighborhood scale: relative contributions and marginal effects. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 132-147.
- [21] 江田汉,邓莲莹. Hurst 指数估计中存在的若干问题——以在气候变化研究中的应用为例.地理科学,2004,24(2): 177-182.
- [22] 任延俊,徐晓荣.基于多元线性回归模型的山东海洋经济发展研究.黑龙江科学,2022,13(12): 112-113.
- [23] 冯启明.多元统计分析方法在医学科研中的应用.广西医学,2006,28(2): 298-302.
- [24] 李玉辰,李宗省,张小平,杨安乐,桂娟,薛健.祁连山国家公园植被时空变化及对人类活动的响应研究.生态学报,2023,43(1): 219-233.
- [25] Xu D Y, Kang X W, Liu Z L, Zhuang D F, Pan J J. Assessing the relative role of climate change and human activities in sandy desertification of Ordos region, China. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(6): 855-868.
- [26] 耿庆玲,陈晓青,赫晓慧,田智慧.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.生态学报,2022,42(9):

3557-3568.

- [27] 张胜平, 陈希村, 苏传宝, 崔着义, 王家顺. 2002 年山东省严重干旱分析. 水文, 2004, 24(3): 42-45.
- [28] 刘晨曦, 陈关州, 王铜, 张晓东, 朱坤, 王庆. 山东省植被覆盖度长时序动态监测与分析. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2021, 52(4): 585-594.
- [29] 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. 地理研究, 2019, 38(4): 807-821.
- [30] 陈火春, 楼毅, 郑云峰, 罗细芳. 我国沿海防护林体系工程建设可持续发展对策研究. 林业资源管理, 2012(4): 13-16.
- [31] 孟紫琪. 中国大陆沿海地区生态状况时空演变及其影响因素探究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [32] 王敏. 人类活动对莱州湾海岸带生态系统的影响及预警研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2021.
- [33] 刘玄. 山东省极端气候变化特性和水文响应分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [34] 何航, 张勃, 侯启, 李帅, 马彬, 马尚谦. 1982—2015 年中国北方生长季 NDVI 变化及其对气温极值的响应. 干旱区研究, 2020, 37(1): 244-253.
- [35] 王海军, 靳晓华, 李海龙, 张勃, 戴声佩. 基于 GIS 和 RS 的中国西北 NDVI 变化特征及其与气候变化的耦合性. 农业工程学报, 2010, 26(11): 194-203.
- [36] 陶泽兴, 葛全胜, 戴君虎, 王焕炯. 1980—2018 年中国东部主要木本植物展叶始期的温度相关时段变化. 生态学报, 2020, 40(21): 7777-7789.
- [37] Melke A. The physiology of chilling temperature requirements for dormancy release and bud-break in temperate fruit trees grown at mild winter tropical climate. *Journal of Plant Studies*, 2015, 4(2): 431-446
- [38] 温智虹, 邓国荣, 赵建军, 张洪岩, 郭笑怡. 大兴安岭植被变绿速率对霜冻的响应研究. 地理科学进展, 2021, 40(5): 839-847.