

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.022.

岳萌, 耿广坡, 王涛, 等. 2000—2019年黄河流域陕西段植被NDVI时空变化及其驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 238-246.

YUE Meng, GENG Guangpo, WANG Tao, et al. Spatiotemporal Variation of Vegetation NDVI and Its Driving Factors in the Shaanxi Section of the Yellow River Basin from 2000 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 238-246.

2000—2019年黄河流域陕西段植被NDVI 时空变化及其驱动因素分析

岳萌, 耿广坡, 王涛, 杨睿, 顾倩

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054)

摘要: 植被是陆地生态系统的重要构成, 研究植被变化规律及影响因素有助于加强区域植被生态保护和可持续发展。基于SPOT NDVI和气象数据, 采用趋势分析、偏相关分析和残差分析等方法对2000—2019年黄河流域陕西段植被NDVI时空变化特征及其驱动因素进行了分析。结果表明: (1) 2000—2019年黄河流域陕西段植被NDVI总体以0.008 6/a的速率呈极显著增加趋势, 不同地域NDVI增速为陕北(0.010 9/a) > 关中(0.005 3/a), 不同土地利用类型NDVI增速为草地(0.011/a) > 耕地(0.008 1/a) > 林地(0.007 8/a)。 (2) 植被NDVI呈增加趋势的面积占比为86.19%, 其中显著增加的面积比例为81.90%, 陕北(91.87%) > 关中(66.91%), 林地(97.48%) > 草地(90.38%) > 耕地(69.78%)。 (3) 偏相关分析发现90.24%的区域植被NDVI与年降水量以正相关关系为主, 66.3%的区域植被NDVI与年均温呈正相关关系。 (4) 研究区植被NDVI变化受到气候变化、人类活动以及二者共同作用的影响, 占比分别为5.65%, 73.11%, 21.24%, 人类活动面积占比陕北(79.88%) > 关中(55.49%), 草地(85.2%) > 耕地(73%) > 林地(59.67%)。总体上, 2000—2019年黄河流域陕西段植被活动明显增强, 降水相比温度对研究区植被影响更大, 人类活动是研究区植被变化的主要驱动力, 这为研究区生态建设和植被恢复提供了重要参考。

关键词: 植被变化; 气候变化; 人类活动; 残差分析; 黄河流域陕西段

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0238-09

Spatiotemporal Variation of Vegetation NDVI and Its Driving Factors in the Shaanxi Section of the Yellow River Basin from 2000 to 2019

YUE Meng, GENG Guangpo, WANG Tao, YANG Rui, GU Qian

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Vegetation is an important component of the terrestrial ecosystem, and studying the rules of vegetation change and its driving factors is helpful to strengthen the ecological protection and sustainable development of regional vegetation. Based on the SPOT NDVI and meteorological data, spatiotemporal characteristics of vegetation NDVI change and its driving factors in the Shaanxi section of the Yellow River Basin from 2000 to 2019 were analyzed by trend analysis, partial correlation analysis and residual analysis. The results are as follows. (1) from 2000 to 2019, the vegetation NDVI in the Shaanxi section of the Yellow River Basin showed the significant increase trend at a rate of 0.008 6/a; the NDVI growth rates in different regions decreased in the order: northern Shaanxi (0.010 9/a) > Guanzhong (0.005 3/a), and the NDVI growth rates in different land use types decreased in the order: grassland (0.011/a) > cropland (0.008 1/a) > forest (0.007 8/a); (2) the proportion of area with an increasing trend of vegetation NDVI accounted for 86.19%, of which the

收稿日期: 2022-05-31

修回日期: 2022-06-29

资助项目: 国家自然科学基金(41807503); 陕西省教育厅科研计划项目(21JK0771); 西安科技大学博士启动金项目(2017QDJ030); 陕西省软科学研究计划(2022KRM034)

第一作者: 岳萌(1994—), 女, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 研究方向为植被遥感应用。E-mail: yuemeng04171@163.com

通信作者: 耿广坡(1986—), 男, 河南浚县人, 博士, 讲师, 主要从事区域环境变化与灾害遥感研究。E-mail: gengguangpo@xust.edu.cn

<http://stbcy.paperonce.org>

proportion of area with a significant increase was 81.90%; the proportion of area with the increased NDVI in different regions decreased in the order: northern Shaanxi (91.87%) > Guanzhong (66.91%), and the proportion of area with the increased NDVI in different land use types decreased in the order: forest (97.48%) > grassland (90.38%) > cropland (69.78%); (3) 90.24% of the regional vegetation NDVI was positively correlated with annual precipitation, and 66.3% of the regional vegetation NDVI was positively correlated with the annual mean temperature; (4) the changes of vegetation NDVI in the study area were affected by climate change, human activities and their combined effects, accounting for 5.65%, 73.11% and 21.24%, respectively; among them, the proportion of human activity area decreased in the order: northern Shaanxi (79.88%) > Guanzhong (55.49%), grassland (85.2%) > cropland (73%) > forest (59.67%). Overall, the vegetation activity in the Shaanxi section of the Yellow River Basin was significantly enhanced from 2000 to 2019. Precipitation had a greater impact on vegetation than temperature in the study area. Human activity was the main driving forces for vegetation change in the study area. These conclusions can provide an important reference for ecological construction and vegetation restoration in the study area.

Keywords: vegetation variations; climate change; human activities; residual analysis; Shaanxi section of the Yellow River Basin

全球气候变暖持续加剧显著影响地球各圈层^[1-2], 作为陆地生态系统的重要组成部分, 植被是促进地球不同圈层间物质循环和能量流动的关键纽带, 对气候变化及人类活动高度敏感^[3-5]。植被变化是热量、水分、太阳辐射等自然因素与土地利用变化等人为因素综合作用的结果, 因此, 深入理解植被动态变化及时空分异规律, 厘清气候要素和人类活动对植被变化的影响, 对区域生态保护和可持续发展至关重要^[6]。

遥感植被指数是开展全球和区域植被变化监测的重要手段。归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)具有空间覆盖面广、监测灵敏度高、可部分消除大气辐射干扰等优点, 已成为表征植被生长状况和植被覆盖度的最佳指示因子, 应用较为广泛^[7]。近年来, 诸多学者基于 NDVI 数据对不同区域植被变化及其影响因素开展了相关研究, 发现植被变化受到气候变化和人类活动的双重影响。如 Lamchin 等^[8]综合 GIMMS-NDVI3g 及气象数据, 采用 Mann-Kendall 趋势检验及残差分析评价全球植被变化情况, 发现 1982—2014 年北半球中纬度地区、南美洲、非洲等地的植被绿度减少趋势最大, 而人类活动是造成植被退化的主要原因。金凯等^[1]基于 1982—2015 年 NDVI 及气象数据, 利用残差分析对中国植被变化及驱动因子进行研究, 结果发现中国植被恢复明显, 气候变化和人类活动的共同作用是中国植被 NDVI 快速增加的主要原因。

黄河流域是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道, 在中国经济社会发展和生态安全方面具有极为重要的战略地位。其中, 黄河流域陕西段位于黄河流域中游, 地处流域心脏位置, 在气候变暖背景

下, 区域降水变率较大, 升温明显, 干旱多发^[9], 同时该区域是中国重要的农牧业和能源生产基地, 也是黄土高原的核心区, 水土流失严重, 生态环境脆弱, 区域植被生长受到气候变化和人类活动的叠加影响^[10-11]。随着大规模的退耕还林还草和水土保持治理等重大生态工程的实施, 黄河流域植被变化显著, 引起学者们的普遍关注, 如刘海等^[12]基于 NDVI 研究黄河流域植被变化趋势及驱动因素, 发现 1982—2019 年黄河流域 NDVI 呈现显著增加趋势, 气候因素是黄河流域植被变化的主导因素, 但人类活动在植被变化中的影响程度逐渐加深。张静等^[13]基于 GIMMS-NDVI3g 对 1982—2015 年黄河流域植被 NDVI 时空变化及影响因素进行分析, 发现随时间序列长度的增加, NDVI 增加区域显著扩大, 且人类活动贡献率大于气候变化。孙高鹏等^[14]基于 MODIS NDVI 对黄河流域植被覆盖变化及其影响因素进行探究, 发现 2001—2020 年黄河流域植被覆盖整体呈显著增长趋势, 气温、降水和 CO₂ 浓度等对黄河流域植被生长起到正向促进作用, 而大气饱和水汽压差、太阳辐射等对植被生长起到抑制作用。总体上, 诸多学者对黄河流域植被变化及其影响因素的研究取得了积极进展, 但在定量分离气候变化和人类活动对植被变化的贡献方面, 相关研究将植被变化的驱动因素归为单一气候变化或人类活动, 而未考虑二者共同作用, 对一些受到气候变化和人类活动双重叠加影响的区域, 其植被变化归因的解释可能会缺乏科学性。

黄河流域陕西段地处半湿润区和半干旱区过渡地带, 是气候变化敏感区, 也是人类活动的主要聚集区, 系统分析区域植被时空变化并区分量化气候变化

和人类活动对植被变化的影响,对黄河流域生态保护和可持续发展具有重要意义。因此,本文基于 2000—2019 年 SPOT NDVI 卫星遥感数据和降水、气温数据,综合采用线性趋势分析、偏相关分析以及残差分析等方法,揭示黄河流域陕西段不同地域及不同植被类型 NDVI 时空变化特征,定量评估气候变化和人类活动对区域植被 NDVI 的影响。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

黄河流域陕西段总面积为 $1.323 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占陕西省总面积的 64.2%, 占黄河流域总面积的 17.7%, 地处黄河流域中段, 位于 $106^\circ\text{—}112^\circ\text{E}$, $34^\circ\text{—}40^\circ\text{N}$, 高程范围为 325~3 677 m。研究区总体可分为陕北、关中两个地理单元, 陕北包括榆林市和延安市, 关中包括铜川市、渭南市、咸阳市和西安市以及宝鸡市大部分和商洛市小部分地区(考虑到研究区的完整性, 且研究区内商洛市面积仅占商洛市总面积的 15%, 分析时将其列入关中地区)。研究区太阳辐射较强、蒸发量较大, 水土流失较为严重^[14], 年均温在 $-1.48\text{—}15.24^\circ\text{C}$, 年降水量 316.55~886.60 mm。研究区内土地利用类型丰富, 耕地、林地、草地、灌木、人造地、水体、裸地(图 1), 其中, 耕地、林地和草地占比接近 95%, 是主要的土地利用类型。

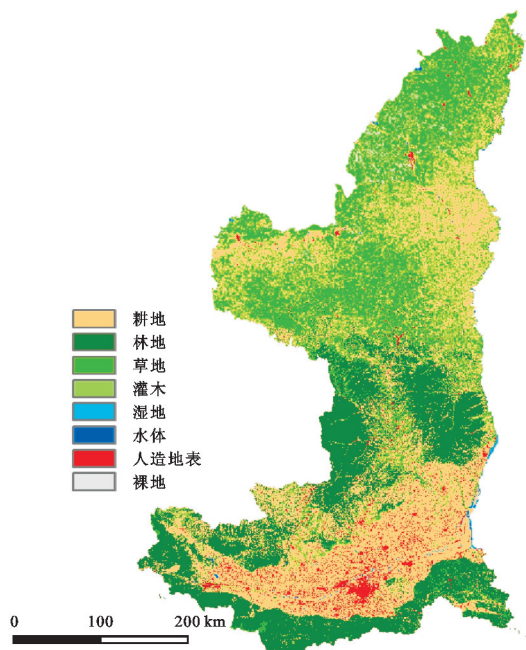


图 1 土地利用类型

1.2 数据来源与预处理

本研究使用的数据包括: NDVI 数据、土地利用数据、气温和降水数据以及造林面积数据。NDVI 数

据为 2000—2019 年的 SPOT/VEGETATION 卫星产品, 来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>), 时间分辨率为 10 d, 空间分辨率为 1 km, 该数据集能有效地表征植被时空演变特征。为了进一步减少大气、云、雾和太阳高度角变化等因素的影响, 采用最大值合成法(MVC)合成月 NDVI 和年 NDVI 数据集。选用研究时段的中间年份(2010 年)土地利用数据, 该数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>), 空间分辨率为 30 m, 采用 Majority 取值方法将其重采样为 1 km 以匹配 NDVI 数据, 本文不同土地利用类型下的结果对比分析均基于该数据开展。

气温与降水数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>), 空间分辨率为 $0.008\ 333\ 3^\circ$ (约 1 km)。该数据是由东安格利亚大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)发布的全球 0.5° 气候数据和 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据, 利用 Delta 空间降尺度方案在中国地区生成, 并采用 496 个独立气象观测点数据进行验证。本文使用 2000—2019 年月平均温和月累计降水数据。

造林面积、GDP 及人口数量均来自陕西省统计年鉴, 本文统计 2000—2019 年榆林市、延安市、铜川市、渭南市、咸阳市、西安市、宝鸡市及研究区内商洛市造林面积, 其中, 研究区内商洛市造林面积由商洛市造林总面积乘以研究区内商洛市面积占商洛市总面积的比例(15%)得到, 并将该指标逐年累加获取累积造林面积, 单位为 km^2 。同时, 收集 2000—2019 年关中地区铜川市、渭南市、咸阳市、西安市、宝鸡市及研究区内商洛市 GDP(亿元)及人口数量(万人), 研究区内商洛市 GDP 及人口数量同样采用造林面积的折算方法获得。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析法 利用趋势分析法计算研究区内逐栅格 NDVI 变化趋势, 可获取 NDVI 变化方向和速率, 探究 NDVI 时空变化特征。计算公式为^[2,15]:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NDVI}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: slope 为逐栅格 NDVI 线性变化速率; i 为时间变量; n 为研究的总年数(本研究中为 20)。slope > 0 表示 NDVI 出现增加趋势, 反之表示 NDVI 出现减少趋势; slope = 0 表示 NDVI 基本无变化。slope 的绝对值表示 NDVI 变化速率, 值越大, 说明 NDVI 的变化速率越大。变化趋势的显著性采用 F 检验法, 显著性值大小仅表示变化趋势的置信水平, 与变化快

慢无关^[16]。F 检验计算公式如下^[17]：

首先基于栅格尺度计算 NDVI 序列的离差平方和：

$$S_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}})^2 \tag{2}$$

计算时间序列和 NDVI 序列的回归平方和：

$$U = \text{slope} \times \sum_{i=1}^n (i - \bar{i})(\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}}) \tag{3}$$

剩余平方和 Q 可以由下式求得：

$$Q = S_{\text{总}} - U \tag{4}$$

F 值可由下式求得：

$$F = \frac{U}{Q/(n-2)} \tag{5}$$

式中： NDVI_i 为 NDVI 实测值； $\overline{\text{NDVI}}$ 为 20 a NDVI 均值，分为 5 个等级：〔显著增加($\theta_{\text{slope}} > 0, F > F_{\alpha} = 0.01$)；轻度增加($\theta_{\text{slope}} > 0, F_{\alpha} = 0.05 < F < F_{\alpha} = 0.01$)；基本不变($F < F_{\alpha} = 0.05$)；显著降低($\theta_{\text{slope}} < 0, F > F_{\alpha} = 0.01$)；轻度降低($\theta_{\text{slope}} < 0, F_{\alpha} = 0.05 < F < F_{\alpha} = 0.01$)〕。

1.3.2 偏相关分析 分析降水或温度对 NDVI 的影响程度时，可以将其中一个变量看作常量，单独研究 NDVI 与降水或 NDVI 与温度的相互关系，则称为偏相关关系^[18]。利用单相关系数计算偏相关系数，单相关系数的计算公式如下：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{6}$$

式中： \bar{x} 和 \bar{y} 分别为两变量 n 年的平均值； r_{xy} 为两要素间的简单相关系数； n 为样本数(本研究中为 20)。

偏相关系数的计算公式如下：

$$r_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xy}^2)} \sqrt{(1-R_{yz}^2)}} \tag{7}$$

偏相关系数显著性检验一般采用 t 检验法^[19]，其统计量计算公式为：

$$t = \frac{r_{1,2,3,\dots,m}}{\sqrt{1-r_{1,2,3,\dots,m}^2}} \sqrt{n-m-1} \quad (i=1,2,3,\dots,m) \tag{8}$$

式中： $r_{xy,z}$ 为偏相关系数； n 为样本数； m 为自变量个数。查 t 分布表，可得到不同显著性水平上的临界值 t_{α} ，若 $t > t_{\alpha}$ ，则表示偏相关显著，反之， $t < t_{\alpha}$ ，则偏相关不显著。

1.3.3 残差分析 残差分析法是目前定量分离气候变化和人类活动对植被变化影响最常用的方法^[20]。该方法包括 3 个步骤：(1) 基于年 NDVI 以及年均温和年累计降水量时间序列数据，以 NDVI 为因变量，以气温和降水量为自变量，建立二元线性回归模型，计算模型中的各项参数；(2) 基于气温和降水量数据以及回归模型的参数，计算得到 NDVI 的预测值

(NDVI_{CC})，用来表示气候因素对植被 NDVI 的影响；(3) 计算 NDVI 观测值与 NDVI_{CC} 的差值，即 NDVI 残差(NDVI_{HA})^[19,21]，用来表示人类活动对植被 NDVI 的影响。具体计算公式如下：

$$\text{NDVI}_{\text{CC}} = a \times T + b \times P + c \tag{9}$$

$$\text{NDVI}_{\text{HA}} = \text{NDVI}_{\text{obs}} - \text{NDVI}_{\text{CC}} \tag{10}$$

式中： NDVI_{CC} 和 NDVI_{obs} 分别为基于回归模型的 NDVI 预测值和基于遥感影像的 NDVI 观测值； NDVI_{HA} 为残差； a, b, c 为模型参数； T 和 P 分别为年均温和年累计降水量，单位分别为 $^{\circ}\text{C}$ 和 mm。基于公式(1)将植被 NDVI 时空演变的驱动因素分为 6 类^[17]，其具体判定标准见表 1^[1]。

表 1 植被 NDVI 变化的驱动因素判定标准

slope(NDVI) ₁	驱动要素	划分标准	
		slope(NDVI) ₂	slope(NDVI) ₃
>0	CC & HA	>0	>0
	CC	>0	<0
	HA	<0	>0
	CC&HA	<0	<0
<0	CC	<0	>0
	HA	>0	<0

注：1,2,3 分别指基于遥感数据的年 NDVI 观测值(NDVI_{obs})的趋势率、基于二元回归分析的年 NDVI 预测值(NDVI_{CC})的趋势率以及年 NDVI 残差值(NDVI_{HA})的趋势率。slope>0 表示植被受到驱动因素的正向促进作用，slope<0 表示植被受到驱动因素的反向抑制作用；CC,HA 和 CC&HA 表示植被变化分别受气候变化驱动、人类活动驱动以及气候变化和人类活动共同驱动。

2 结果与分析

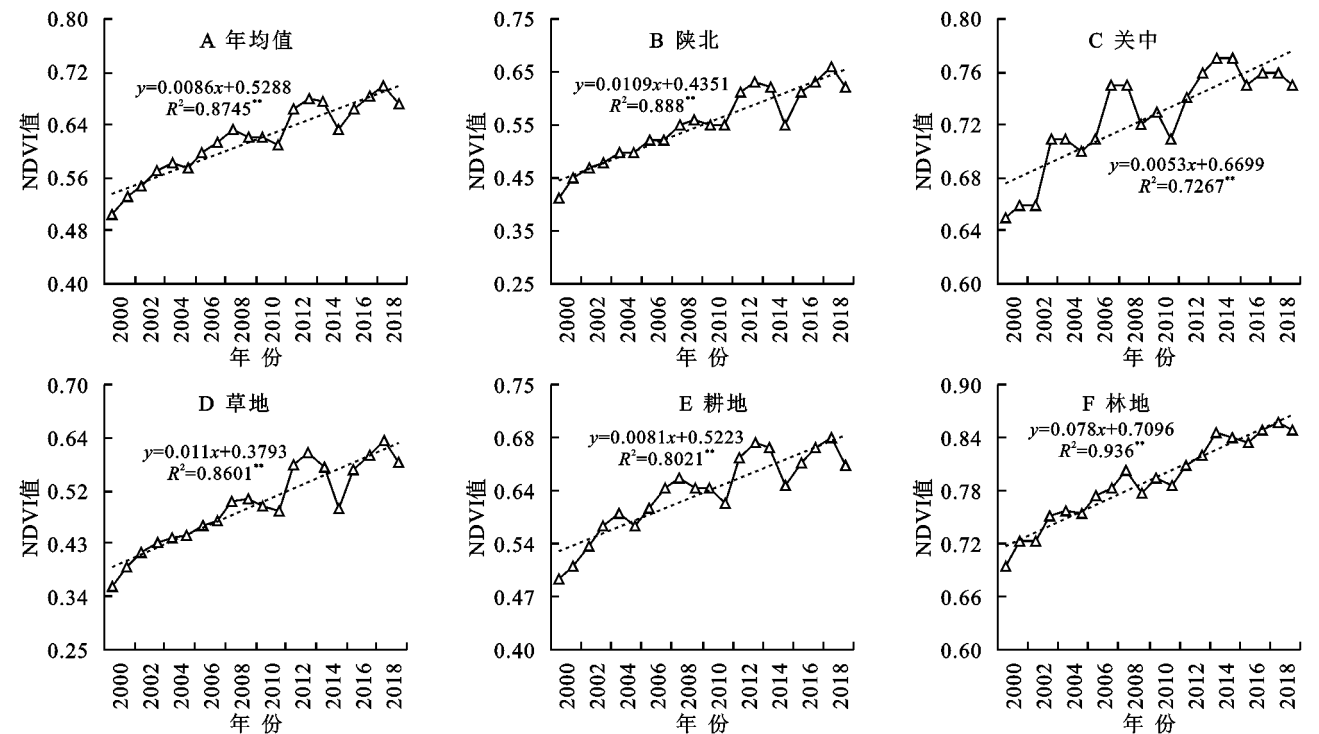
2.1 NDVI 时空变化特征

2000—2019 年黄河流域陕西段 NDVI 总体呈线性增加趋势(图 2A)，增加速率为 0.008 6/a($p < 0.01$)。变化过程具有一定的波动性，周期性明显，如 2000—2005 年、2005—2011 年、2011—2015 年和 2015—2019 年，变化过程均呈现出先大幅增加后小幅降低的波动上升过程，周期 5~6 a。

在不同地域上，2000—2019 年陕北、关中地区 NDVI 整体上均呈线性增加趋势(图 2B,2C)，增加速率分别为 0.0109/a,0.005 3/a($p < 0.01$)，陕北地区植被 NDVI 的增加速率将近关中地区的 2 倍，这可能与 1999 年起陕北地区实施的退耕还林还草政策有密切关系，同时可以看出，关中地区植被 NDVI 相比陕北地区波动较大，2008—2012 年 NDVI 甚至出现明显下降。从不同植被类型来看，草地、耕地和林地 NDVI 均呈现增加趋势(图 2D,2E,2F)，增加速率分别约为 0.011/a,0.008 1/a,0.007 8/a，增速为草地>耕地>

林地,且均通过了显著性检验($p<0.01$)。草地是陕北的主要植被类型^[22],其 NDVI 增速最大,且草地和

耕地 NDVI 的波动变化一致性较高,均在 2008—2011 年和 2013—2015 年出现下降。



注: * 表示通过了 0.05 的显著性检验, ** 表示通过了 0.01 的显著性检验。

图 2 2000—2019 年 NDVI 变化趋势

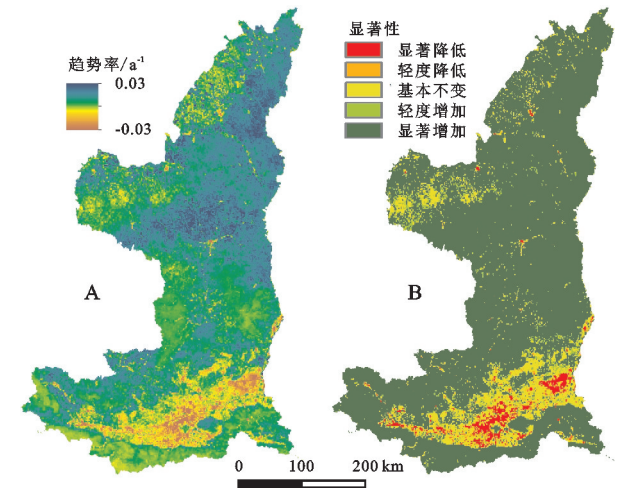


图 3 2000—2019 年 NDVI 变化趋势及其显著性的空间分布

从空间上看,黄河流域陕西段 2000—2019 年植被 NDVI 变化趋势率 $-0.03\sim0.03$ (图 3A),统计分析发现,研究区植被 NDVI 增加、基本不变和降低的区域面积占比分别为 86.19%,10.58%,3.24%(表 2),其中,植被 NDVI 呈显著增加面积占比为 81.9%,主要分布在延安市、榆林市、铜川市、宝鸡市北部、咸阳市北部等黄土高原地区以及西安市南部、商洛市东北部等秦岭山区,呈显著降低的区域占比为 2.43%,主要分布在研究区南部人类活动聚集区(图 3B),这说明近 20 年来研究区植被活动总体在增强。从不同地域来看,陕北地区植被 NDVI 呈显著增加的占比更

大,约为 91.87%,关中地区为 66.91%。不同植被类型 NDVI 呈显著增加的面积比例从高到低为林地(97.48%)>草地(90.38%)>耕地(69.78%),显著降低面积占比最大的是耕地,为 4.05%。

表 2 NDVI 线性变化速率显著性检验统计 %

类别	显著降低	轻度降低	基本不变	轻度增加	显著增加
研究区	2.43	0.81	10.58	4.29	81.90
陕北	0.16	0.07	4.36	3.54	91.87
关中	5.88	1.92	19.86	5.42	66.91
耕地	4.05	1.49	18.33	6.35	69.78
林地	0.08	0.04	1.44	0.96	97.48
草地	0.13	0.08	5.18	4.22	90.38

2.2 植被 NDVI 与气候因素的偏相关分析

近 20 年来,黄河流域陕西段年均温和降水量均呈现出增加趋势,气候有暖湿化的可能,其中,年均温增加趋势为 $0.005\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,年均降水量增加趋势为 2.868 mm/a (图 4)。为探究温度、降水对研究区植被 NDVI 的单独影响程度,分别对年均温、年降水量和 NDVI 进行偏相关分析,结果发现,NDVI 与年均温、年降水量的偏相关系数分别在 $-0.70\sim0.71$, $-0.61\sim0.82$ (图 5A、图 5C),二者均值分别为 0.10,0.30,NDVI 与温度的偏相关系数小于 NDVI 与降水的偏相关系数,这可能是由于研究区处于黄河流域中游,随着气候变暖加剧,干

旱发生概率增加,制约了植被生长^[12]。

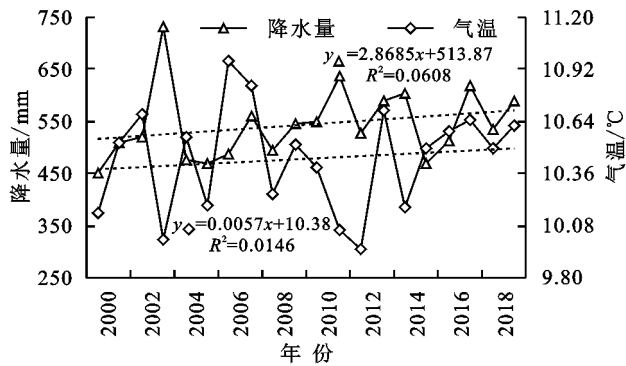


图 4 2000—2019 年降水量和气温年际变化趋势
对研究区植被 NDVI 与年均温、年降水量的偏

相关系数分别进行显著性检验发现,区域植被 NDVI 与年均温呈正相关的面积占比约 62.20%,呈负相关的占比为 33.42%,二者分别集中于研究区东部和西部(图 5B,表 3),显著正相关和显著负相关面积占比均不足 5%。区域植被 NDVI 与年降水量呈正相关的面积比例约 69.84%,分布在研究区中部和北部,呈负相关的区域为 9.66%,零散分布于研究区南部,呈显著正相关的区域占比为 20.40%,呈条带分布,集中在研究区北部(图 5D,表 4),呈显著负相关的区域不足 1%。总体来看,黄河流域陕西段降水比温度对植被 NDVI 的影响更大。

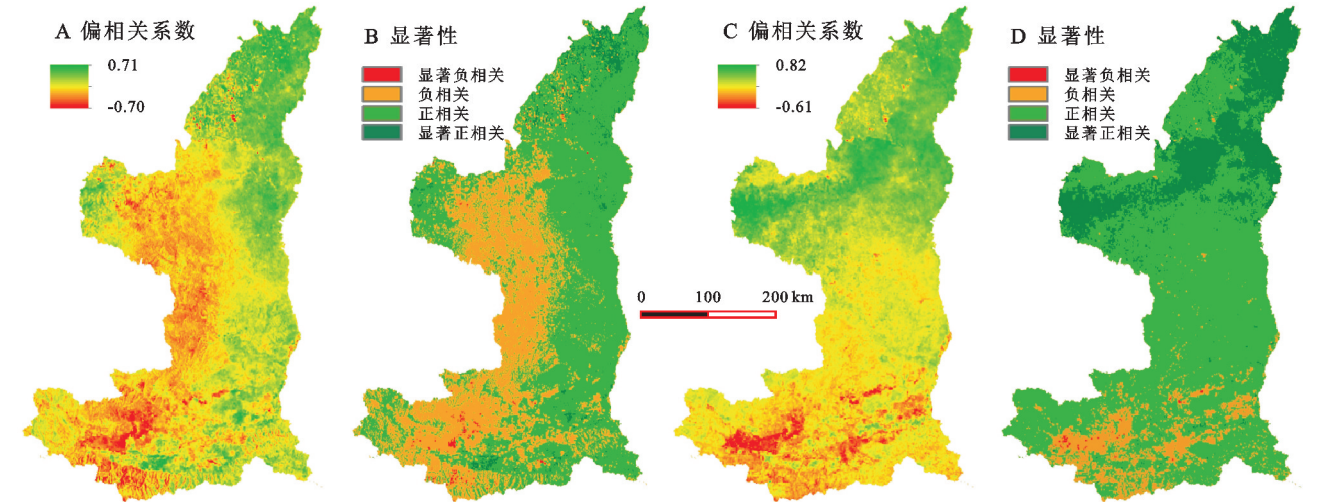


图 5 NDVI 与年均温、年降水量的偏相关系数(A,C)及其显著性(B,D)

表 3 NDVI 与温度偏相关系数显著性检验统计

类别	%			
	显著负相关	负相关	正相关	显著正相关
研究区	0.32	33.42	62.60	3.66
陕北	0.08	28.59	66.42	4.91
关中	0.70	41.13	56.65	1.52
耕地	0.37	29.22	67.29	3.12
林地	0.39	47.09	52.15	0.36
草地	0.15	27.62	65.37	6.86

表 4 NDVI 与降水偏相关系数显著性检验统计

类别	%			
	显著负相关	负相关	正相关	显著正相关
研究区	0.10	9.66	69.84	20.40
陕北	0.00	0.45	66.80	32.75
关中	0.26	24.02	75.21	0.52
耕地	0.21	13.44	64.70	21.65
林地	0.00	10.73	88.50	0.77
草地	0.01	1.40	62.08	36.51

从不同地域来看,陕北、关中地区植被 NDVI 与温度呈正相关的面积占比分别为 66.42%,56.65%,呈负相关的面积占比分别为 28.59%,41.13%,呈显著正相关的占比为 4.91%,1.52%,呈显著负相关的

区域二者均不足 1%,陕北植被与温度呈正相关和显著正相关的面积比例大于关中。陕北、关中地区植被 NDVI 与降水呈正相关的面积占比分别为 66.80%,75.21%,呈负相关的面积占比分别为 0.45%,24.02%,呈显著正相关的面积占比分别为 32.75%,0.52%。陕北、关中地区 NDVI 与降水偏相关关系主要为正相关,且陕北显著正相关比例大于关中,关中显著负相关比例大于陕北(表 3—4)。总体上,陕北相比关中对降水和温度关系更紧密,尤其是降水因素。

从不同土地利用类型来看,耕地、林地、草地 NDVI 与温度呈正相关的面积占比分别为 67.29%,52.15%,65.37%,呈负相关的面积占比分别为 29.22%,47.09%,27.62%,呈显著正相关的面积比例分别为 3.12%,0.36%,6.86%,呈显著负相关的均不到 1%,可以看出,耕地和草地 NDVI 与温度以正相关关系为主,而林地 NDVI 和温度呈正相关和负相关关系的区域则几乎各占一半。耕地、林地、草地 NDVI 与降水呈正相关的面积占比分别为 64.70%,88.5%,62.08%,呈负相关的面积占比分别为 13.44%,10.73%,1.40%,呈显著正相关的面积占比分别为 21.65%,0.77%,36.51%,呈显著负相

关的区域均小于 0.3%。耕地、林地、草地 NDVI 与降水主要为正相关关系,且显著正相关比例从大到小表现为草地>耕地>林地(表 3—4),而负相关比例从高到低为耕地>林地>草地。

2.3 植被 NDVI 变化的驱动力分析

残差值在不同时段的空间分布可以反映出人类活动对植被 NDVI 的影响变化,残差值大于 0 表示人类活动对植被 NDVI 的增加起促进作用,残差值小于 0 表示人类活动对植被 NDVI 的增加起抑制作用,

绝对值的大小代表人类活动对植被 NDVI 影响力的大小^[23-24]。由图 6 可知,2000 年、2019 年研究区植被 NDVI 受人类活动的影响呈相反的空间分布状态。2000 年残差值大于 0 的区域面积占比约为 8.36%,残差值小于零的区域面积占比约为 91.64%;2019 年残差值大于零的区域面积占比约为 76.43%,残差值小于零的区域面积占比约为 23.57%,说明人类活动对研究区 2000—2019 年植被 NDVI 促进作用增强,抑制作用减弱。

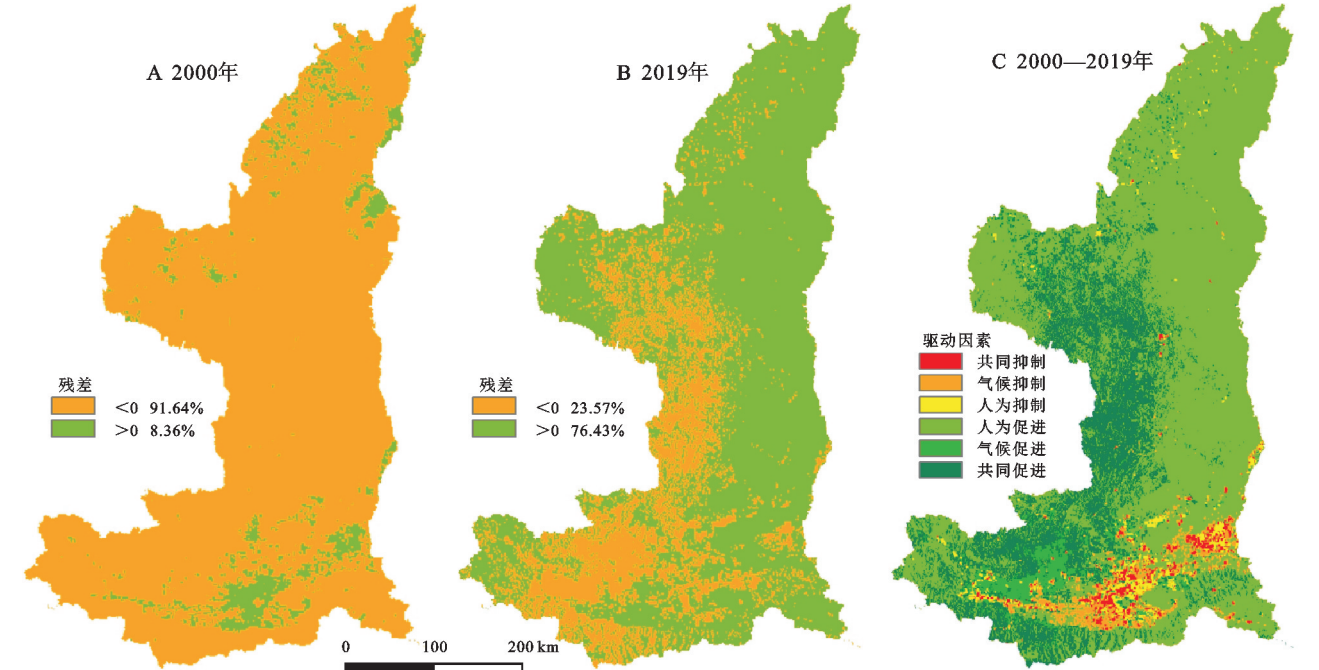


图 6 2000 年残差值、2019 年残差值及 2000—2019 年植被变化驱动因素空间分布

根据残差理论及驱动因素判定标准(表 1),计算并获取研究区植被 NDVI 变化的驱动因素空间分布图(图 6)。统计结果显示,6 种驱动因素的面积占比从高到低分别是人为促进(71.09%)>共同促进(19.97%)>气候促进(2.98%)>气候抑制(2.67%)>人为抑制(2.02%)>共同抑制(1.27%)(表 5),其中,人为促进主要分布在研究区中部、东部和北部,共同促进主要分布在研究区西部和西南部,而植被变化受到抑制的区域主要集中在研究区中南部。将驱动因素合并为气候变化、人类活动和二者共同作用 3 类,则 3 者占比分别为 5.65%,73.11%,21.24%,可以看出,人类活动是研究区植被变化的主要驱动力,气候变化和人类活动共同作用次之,气候变化贡献最小。

从不同地域来看,陕北、关中地区植被 NDVI 变化由气候变化和人类活动共同促进的区域面积占比分别是 19.09%,25.88%,二者共同抑制面积占比分别为 0.08%,3.59%;由人类活动促进面积比例分别为 79.36%,50.67%,由人类活动抑制的面积比例分别为 0.52%,4.82%;由气候变化促进和抑制的面积

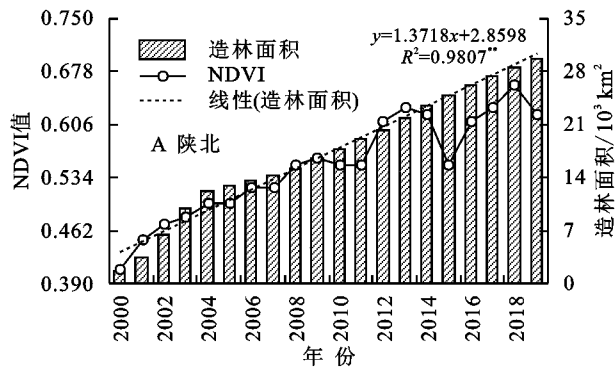
占比较少(表 5)。总体上,陕北植被变化受人类活动影响的面积(79.88%)占比大于关中(55.49%)。

表 5 不同类别下植被 NDVI 变化驱动力像元占比 %

类别	共同抑制	气候抑制	人为抑制	人为促进	气候促进	共同促进
研究区	1.27	2.67	2.02	71.09	2.98	19.97
陕北	0.08	0.17	0.52	79.36	0.78	19.09
关中	3.59	6.99	4.82	50.67	8.06	25.88
耕地	2.29	5.46	3.49	69.51	5.75	13.50
林地	0.06	0.19	0.09	59.58	1.09	39.00
草地	0.06	0.11	0.26	84.94	0.67	13.96

通过统计发现,陕北近 20 a 累积造林面积及其速率均高于关中(图 7),这与陕北退耕还林还草和水土保持工程建设等积极的人类活动有紧密联系。从不同土地利用类型来看,耕地、林地、草地 NDVI 由气候变化和人类活动共同促进的区域面积比例分别达到 13.50%,39.00%,13.96%,由二者共同抑制的区域面积占比分别为 2.29%,0.06%,0.06%;由人类活动促进的区域

面积比例分别是 69.51%, 59.58%, 84.94%, 由人类活动抑制的区域面积比例分别为 3.49%, 0.09%, 0.26%, 而由气候变化促进和抑制的区域面积都较少(表 5)。综合



来看,草地、耕地和林地 NDVI 变化的影响因素中,人类活动均是面积占比最大的,其中,草地面积比例最大(85.2%),耕地次之(73%),林地最少(59.67%)。

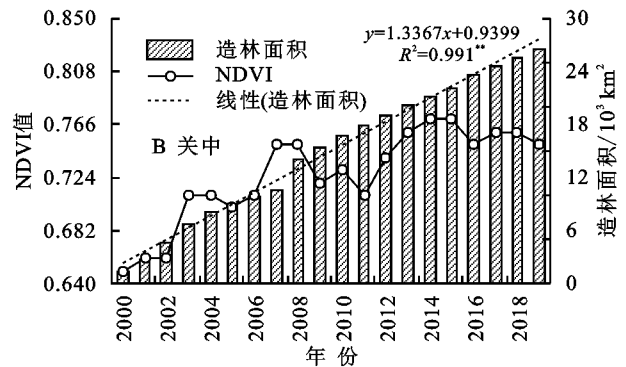


图7 2000—2019年NDVI与造林面积年际变化趋势

3 讨论

植被生长受到气候变化和人类活动的综合影响,本研究发现 2000—2019 年黄河流域陕西段植被 NDVI 以 0.008 6/a 的速率呈极显著增加趋势,这与殷崎栋等人^[25]研究结果基本一致,其原因主要有两个:一方面,黄河流域陕西段地处半湿润区和半干旱区过渡带,降水是影响区域植被生长最主要的气候因素,近 20 年来研究区降水量呈上升趋势(图 4),气候变湿可能有利于植被生长^[26];另一方面,2000 年以来黄河流域全面实施的退耕还林还草生态工程等积极的人类活动,有效增加了区域植被覆盖度^[27]。同时,本文发现不同土地覆盖类型 NDVI 和降水呈负相关比例从高到低为耕地>林地>草地,这是因为呈负相关的耕地主要分布在关中地区,该地区农业生产以灌溉为主,灌溉农业相比雨养农业对降水的依赖度较弱^[28]。

利用残差分析法,本文定量评估了气候变化和人类活动对植被 NDVI 的影响,发现人类活动是研究区植被变化的主要驱动力,气候变化和人类活动共同作用次之,气候变化贡献最小,这与张静等^[13]的研究结果较为接近,但与刘海等^[12]的结果不同,其认为气候变化是植被变化的主要因素,原因可能是其研究时段更长(1982—2019 年)以及影响因素分类标准的设定与本文不同。植被除了受到气候变化和人类活动共同促进作用之外,也会受到二者的共同抑制作用,在研究区南部关中地区,部分植被呈现较明显的退化趋势(图 3B),大规模的城市扩张和建设等人类活动挤占耕地和林地^[29],对区域植被生长产生了消极作用。GDP 及人口数量是表征人类活动的重要指标,从图 8 可以看出,关中地区 2000—2019 年 GDP 及人口数量均呈显著上升趋势,这说明关中地区植被退化

可能受人类活动影响较大。此外,关中地区植被退化可能与降水量波动较大以及温度快速上升有一定关系^[1]。在不同地域上,本文发现陕北有约 80% 的区域植被受到人类活动的正向影响,面积比例高于关中地区,这与近 20 年来陕北累积造林面积速率和面积都要大于关中有紧密关联(图 7)。

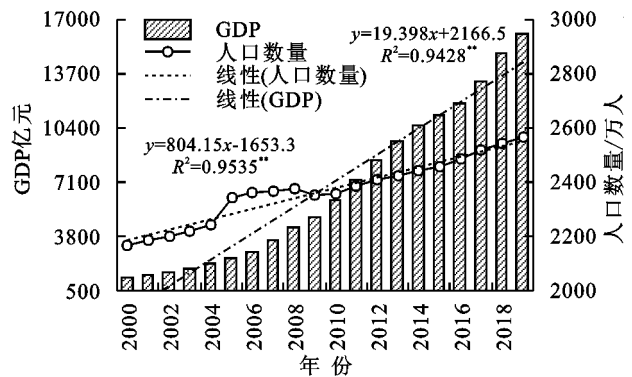


图8 2000—2019年关中地区GDP及人口数量年际变化趋势

此外,本研究还存在一定的不确定性,表现在:(1) 本文仅使用降水和温度表征气候变化,而影响植被生长的气候因素是多方面的,如干旱^[30]、日照时数、相对湿度等气候因素没有考虑,使得结果具有一定的不确定性;(2) 本文只使用了 2010 年的土地利用数据,没有考虑不同时期土地利用变化的影响,对于最终结果也会有一定的不确定性。(3) 本文计算研究区涉及的商洛市造林面积、GDP 及人口数量所采用的方法存在一定的不确定性,但由于研究区内商洛市面积仅占关中地区总面积的 7%,因此对研究结果准确性的影响较小。

4 结论

(1) 2000—2019 年黄河流域陕西段植被 NDVI 呈极显著增加趋势,增加速率约为 0.0086/a,有约 81.90%

区域植被 NDVI 呈显著增加,这表明研究区近 20 年植被活动在增强,植被覆盖状况有明显的改善。不同地域上 NDVI 增速表现出陕北>关中,不同土地利用类型则表现为草地>耕地>林地的态势,植被 NDVI 呈显著增加的面积比例在不同地域上陕北(91.87%)>关中(66.91%),不同土地利用类型则从高到低为林地(97.48%)>草地(90.38%)>耕地(69.78%)。

(2) 近 20 年来,黄河流域陕西段年均温和降水量均呈现上升趋势,气候有暖湿化的可能,偏相关分析表明 90.24% 的区域植被 NDVI 与年降水量以正相关关系为主,66.3% 的区域植被 NDVI 与年均温呈正相关关系,说明降水因素对研究区植被的影响更大,其中,陕北植被相比关中对降水依赖更大。

(3) 研究区植被 NDVI 变化的驱动因素面积占比从高到低分别是人为促进(71.09%)>共同促进(19.97%)>气候促进(2.98%)>气候抑制(2.67%)>人为抑制(2.02%)>共同抑制(1.27%),将驱动因素合并为气候变化、人类活动和二者共同作用 3 类,占比分别为 5.65%,73.11%,21.24%,说明人类活动是研究区植被变化的主要驱动力,气候变化和人类活动共同作用次之,气候变化贡献最小。

(4) 陕北植被 NDVI 变化受人为促进作用面积占比接近 80%,大于关中,尤其表现在近 20 年累积造林面积及其速率方面,说明陕北退耕还林还草和水土保持工程建设等积极的人类活动对植被增强起着重要作用。此外,人类活动占主导地位的区域中草地占比最大(85.2%),耕地次之(73%),林地最少(59.67%)。

参考文献:

- [1] 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):75-88.
- [2] 陈晨,王义民,黎云云,等.黄河流域 1982—2015 年不同气候区植被时空变化特征及其影响因素[J].长江科学院院报,2022,39(2):56-62,81.
- [3] 丁海勇,丁昕玮.基于 SPOT_NDVI 的甘肃省植被覆盖变化及其与气候、地形因子的关系[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2665-2678.
- [4] 张亮,丁明军,华敏,等.1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J].自然资源学报,2018,33(12):2084-2097.
- [5] 李晶,刘乾龙,刘鹏宇.1998—2018 年呼伦贝尔市植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J].生态学报,2022,42(1):220-235.
- [6] 秦格霞,芦倩,孟治元,等.1982—2015 年中国北方草地 NDVI 时空动态及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(1):101-108,117.
- [7] 陈婷,夏军,邹磊,等.白洋淀流域 NDVI 时空演变及其对气候变化的响应[J].资源科学,2021,43(6):1248-1259.
- [8] Lamchin M, Wang S W, Lim C H, et al. Understanding global spatio-temporal trends and the relationship between vegetation greenness and climate factors by land cover during 1982—2014[J]. Global Ecology and Conservation, 2020,24:e01299.
- [9] Yao N, Li Y, Lei T, et al. Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961—2013 [J]. Science of the Total Environment, 2018,616:73-89.
- [10] Zhao A, Zhang A, Liu J, et al. Assessing the effects of drought and ‘Grain for Green’ Program on vegetation dynamics in China’s Loess Plateau from 2000 to 2014[J]. Catena, 2019,175:446-455.
- [11] 彭苏萍,毕银丽.黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J].煤炭学报,2020,45(4):1211-1221.
- [12] 刘海,刘凤,郑粮.气候变化及人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):143-151.
- [13] 张静,杜加强,盛芝露,等.1982—2015 年黄河流域植被 NDVI 时空变化及影响因素分析[J].生态环境学报,2021,30(5):929-937.
- [14] 孙高鹏,刘宪锋,王小红,等.2001—2020 年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素[J].中国沙漠,2021,41(4):205-212.
- [15] 张君,延军平.1982—2013 年陕西不同植被类型 NDVI 变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(4):86-92.
- [16] 郑勇,杨武年,刘冲,等.川西高原近 20 年植被覆盖变化遥感动态监测及驱动力分析[J].遥感技术与应用,2020,35(6):1447-1456.
- [17] 卫宇婷.山西省 1986—2015 年植被覆盖变化分析及其对气候因子的响应[D].太原:山西农业大学,2018.
- [18] Wang G, Wang P, Wang T Y, et al. Contrasting changes in vegetation growth due to different climate forcings over the last three decades in the selenga-baikal basin[J]. Remote Sensing, 2019, 11(4): 426.
- [19] 田智慧,任祖光,魏海涛.2000—2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制[J].环境科学,2022,43(2):743-751.
- [20] Jiang L, Bao A, Guo H, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. Science of the Total Environment, 2017,599:967-980.
- [21] 杨钰杰,白晓永,谭秋,等.1982—2015 年“一带一路”地区 NDVI 时空演变规律及其影响因素[J].山地学报,2020,38(2):252-264.

[10] 刘晓冉,康俊,王颖,等.基于 GIS 的重庆地区不同季节干旱灾害风险评估与区划[J].自然灾害学报,2019,28(2):92-100.

[11] 赵天保,陈亮,马柱国.CMIP5 多模式对全球典型干旱半干旱区气候变化的模拟与预估[J].科学通报,2014,59(12):1148-1163.

[12] 许崇海,罗勇,徐影.IPCC AR4 多模式对中国地区干旱变化的模拟及预估[J].冰川冻土,2010,32(5):867-874.

[13] 韩会庆,张娇艳,陈梦玲,等.RCPs 情景下贵州省干旱趋势分析[J].水利水电技术,2018,49(10):1-7.

[14] 张奇谋,陈思,陈松生,等.不同 RCP 情景下未来汉江流域气象干旱变化趋势预估研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1470-1480.

[15] 周天军,邹立维,陈晓龙.第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J].气候变化研究进展,2019,15(5):445-456.

[16] 姜彤,景丞,王艳君,等.SSPs 路径下实现全球可持续发展目标的可能性分析[J].中国科学:地球科学,2020,50(10):1445-1454.

[17] 韩兰英,张强,姚玉璧,等.近 60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因[J].地理学报,2014,69(5):632-639.

[18] 姚玉璧,张强,王劲松,等.中国西南干旱对气候变暖的响应特征[J].生态环境学报,2014,23(9):1409-1417.

[19] Wang L, Chen W, Zhou W. Assessment of future drought in Southwest China based on CMIP5 multimodel projections[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014,31(5):1035-1050.

[20] 苏秀程,王磊,李奇临,等.近 50 a 中国西南地区地表干湿状况研究[J].自然资源学报,2014,29(1):104-116.

[21] 张武龙,张井勇,范广洲.CMIP5 模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估[J].大气科学,2015,39(3):559-570.

[22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.气象干旱等级 GB/T20481—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

[23] 刘媛媛,王绍强,王小博,等.基于 AHP_熵权法的孟印地区洪水灾害风险评估[J].地理研究,2020,39(8):1892-1906.

[24] 王鹏涛.西北地区干旱灾害时空统计规律与风险管理研究[D].西安:陕西师范大学,2018.

[25] 周秀华.我国西南及周边地区气候的模拟和预估[D].北京:中国气象科学研究院,2014.

[26] 刘小刚,冷险险,孙光照,等.基于 1961—2100 年 SPI 和 SPEI 的云南省干旱特征评估[J].农业机械学报,2018,49(12):236-245,299.

[27] 吕桂军,冷险险,刘小刚,等.基于 CMIP5 多模式集合预估贵州省干旱时空变化[J].江苏大学学报:自然科学版,2021,42(2):221-228.



(上接第 246 页)

[22] 鲁亚楠,姚顺波,邓元杰,等.陕北地区土地利用及景观格局变化对生态服务价值的影响:基于退耕还林(草)背景[J].中国农业资源与区划,2019,40(11):180-192.

[23] 何云玲,余岚,屈新星,等.云南喀斯特关键带植被时空变化特征及气候与人为影响因子解析[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):439-447.

[24] 董懿,尹冬勤,李渊,等.黄土高原植被的时空变化及其驱动力分析研究[J].中国农业大学学报,2020,25(8):120-131.

[25] 殷崎栋,柳彩霞,田野.基于 MODIS NDVI 数据的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响[J].生态学报,2021,41(4):1571-1582.

[26] Zhu Z, Bi J, Pan Y, et al. Global data sets of vegetation leaf area index(LAI)3g and fraction of photosynthetically active radiation (FPAR)3g derived from global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) normalized difference vegetation index(NDVI3g) for the period 1981 to 2011 [J]. Remote Sensing, 2013,5(2):927-948.

[27] Zhao A Z, Zhang A B, Liu X F, et al. Spatiotemporal changes of normalized difference vegetation index(NDVI) and response to climate extremes and ecological restoration in the Loess Plateau, China[J]. Theoretical and Applied Climatology,2018,132:555-567.

[28] Geng G, Yang R, Liu L. Downscaled solar-induced chlorophyll fluorescence has great potential for monitoring the response of vegetation to drought in the Yellow River Basin, China: Insights from an extreme event[J]. Ecological Indicators, 2022,138:108801.

[29] Piao S, Yin G, Tan J, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years[J]. Global Change Biology, 2015,21(4):1601-1609.

[30] 杨睿,耿广坡,周洪奎,等.基于 SPEI_PM 指数的渭河流域气象干旱时空演变特征[J].中国农业气象,2021,42(11):962-974.