

2000—2020 年陕西省植被 NDVI 时空变化及气候因子探测

李霞¹, 王孝康², 刘秀花^{3,4}, 张乐艺^{3,4}, 金相皓¹, 陈永昊¹

(1.长安大学 土地工程学院, 西安 710054; 2.国家林业和草原局西北调查规划院, 西安 710041;

3.长安大学 水利与环境学院, 西安 710054; 4.旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要:[目的]揭示陕西省不同生态系统植被时空变化,厘清不同气候因子及相互作用对植被变化的影响机制,为区域生态环境保护提供理论依据。[方法]基于 MODIS NDVI 及年均高温、年均低温、年均温、年总降水数据,采用 Theil-Sen Median 趋势、偏相关、地理探测器等方法,分析了 2000—2020 年各地貌分区植被 NDVI 时空变化特征,结合变量分离探究了植被 NDVI 变化与降水、气温的内部关联和响应机制。[结果] 2000—2020 年陕西植被 NDVI 波动增加,速率为 5.9%/10 a,速率大小为陕北>关中>陕南;全省多年植被 NDVI 值为 0.71,南高北低;植被 NDVI 显著改善区域占比 67%,分区占比为陕北>陕南>关中。2000—2020 年陕西气候因子随时间波动变化,速率大小为陕南>关中>陕北,空间上呈现年均高温降低、年均低温上升、年均温降低、降水增加。2000—2020 年陕西及各分区植被 NDVI 与年均高温整体呈负相关,与年均低温、年均温、年总降水量呈正相关;全省及陕北年总降水贡献最大,关中和陕南年均高温贡献最大;年均高温与年总降水交互主导全省、陕北及陕南植被 NDVI 变化,年均温与年总降水的交互主导关中植被 NDVI 变化。[结论]研究期陕西及各分区植被整体变好,各分区植被对气候的响应关系、各因子的贡献及其相互作用不同,降水和年均高温、年均温的交互显著影响植被 NDVI 变化。

关键词:植被 NDVI; 时空变化; 地理探测器; 陕西省

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2024)02-0443-11

Spatiotemporal Variation of Vegetation NDVI and Climate Factor Detection in Shaanxi Province from 2000—2020

Li Xia¹, Wang Xiaokang², Liu Xiuhua^{3,4}, Zhang Leyi^{3,4}, Jin Xianghao¹, Chen Yonghao¹

(1.College of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2.Northwest Research and Planning Institute, State Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710041, China; 3.College of

Water Resources and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 4.Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract:[Objective] This paper reveals the spatiotemporal changes of vegetation in different ecosystems in Shaanxi Province, clarifies the influence mechanisms of different climatic factors and their interactions on the changes of vegetation, and provides a theoretical basis for regional ecological environmental protection. [Methods] Based on MODIS NDVI and annual average high temperature, annual average low temperature, annual average temperature, and annual total precipitation data, this paper analyzed the spatiotemporal variation characteristics of vegetation NDVI in each landscape partition from 2000 to 2020 by Theil-Sen Median trend, partial correlation, and geodetector, and the internal correlations and response mechanisms of

收稿日期:2023-04-27

修回日期:2023-05-29

资助项目:国家高端外国专家引进项目“生态平衡评估指标体系研究”(G2021171029L)

第一作者:李霞(1977—),女,陕西西安人,博士,副教授,主要从事地理信息学、生态遥感及生态修复研究。E-mail:lixia666@chd.edu.cn

通信作者:王孝康(1973—),男,陕西合阳人,高级工程师,主要从事国土绿化与生态价值评价技术与研究。E-mail:867920018@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

vegetation NDVI changes with precipitation and temperature were investigated by combining variable separation. [Results] Vegetation NDVI in Shaanxi fluctuated and increased from 2000 to 2020 at a rate of 5.9%/per decade, among which the rate of vegetation NDVI decreased in the different landscape in the order: Northern Shaanxi>Guanzhong>Southern Shaanxi. The multi-year vegetation NDVI value of the province was 0.71, with high level in the south and low level in the north. Vegetation NDVI in 67% of the regions showed a significantly improved trend during the study period, and the proportion in different landscape decreased in the order: Northern Shaanxi>Southern Shaanxi>Guanzhong. The climate factors fluctuated over time in Shaanxi from 2000 to 2020, the change rates in different landscape decreased in the order: Shaanxi South>Guanzhong>Shaanbei. The spatial trends of temperature factors showed the decrease in annual average high temperature, the increase in annual average low temperature, and the decrease in annual average temperature, and the increase in precipitation. The overall vegetation NDVI of Shaanxi and each subdistrict from 2000 to 2020 was negatively correlated with annual average high temperature and positively correlated with annual average low temperature, annual average temperature, and annual total precipitation. The contribution of annual total precipitation was greatest in the province and northern Shaanxi, and the contribution of annual average high temperature was greatest in Guanzhong and southern Shaanxi. The interaction of annual average high temperature and total annual precipitation had the strongest influence on vegetation NDVI in the province, northern Shaanxi and southern Shaanxi, and the interaction between annual mean temperature and total annual precipitation had the strongest effect on vegetation NDVI in Guanzhong. The interaction of precipitation with maximum and annual average temperatures significantly influenced the vegetation NDVI changes. [Conclusion] The vegetation in Shaanxi and the sub-regions had become better overall during the study period. The vegetation in each sub-region responded differently to climate, and the contribution of each factor and its interactions also differed.

Keywords: vegetation NDVI; spatiotemporal variation; geodetector; Shaanxi Province

全球变暖导致极端天气和气候事件更频繁地发生,对生态系统产生重大影响^[1]。植被是陆地生态系统的重要组成部分,连接着大气圈、土壤圈、水圈等多个圈层^[2],在水土保持、气候调节、碳氮循环等生态系统服务方面发挥着至关重要的作用^[3]。因此,研究植被变化及其驱动力对生态环境具有重要意义^[4]。

植被变化研究一直备受关注,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是植被生长状况和植被空间分布密度的良好指标^[5],常用来表征植被分布与变化。不同地域的水热条件差异会显著影响陆地生态系统植被生长^[6],降水是控制植被生长的关键因素,特别是干旱半干旱地区,土壤水分会严重限制植被发育^[7]。气温控制着植被光合作用,同时气温升高可能会影响植被物候、延长生长季,进而对植被生长产生显著影响^[8]。Gao 等^[9]在毛乌素地沙地 NDVI 变化研究中,得出气温和降水能够较好地解释植被动态变化,且不同时间尺度上主导因素不同。杨延征等^[10]使用 SPOT-VGT NDVI 对陕北地区植被的时空变化进行分析,研究得出气温和降水是影响植被变化的重要气候因子。邓晨晖等^[11]通过趋势分

析、多元回归残差法、偏最小二乘回归法,分析了秦岭地区 2000—2015 年植被覆盖的变化特征,探究了其对于气候变化与人类活动的双重响应机制。已有研究中相关分析、偏最小二乘回归和多元回归分析等方法较为常用,然而陆地植被生长对驱动因子响应是一个复杂的过程,往往是非线性和交互关系,而传统的统计方法只有当植被变化与其驱动力之间的关系为线性时才有效^[12],因此在开展复杂地貌单元生态系统对比研究时常常不能凸显出其优势。近年来,新的模型与分析方法在不断发展,如交叉小波分析^[13]、支持向量机(Support Vector Machines, SVM)^[14]、地理探测器等,其中地理探测器是一种用于探测空间分异性,不必遵循传统统计方法的线性假设,是揭示自变量对因变量影响机制的模型,在土地利用、植被生态方面受到学者关注,得到广泛应用^[15-16]。

陕西是黄河和秦岭国家生态保护战略的重点区,作为天然保护林及退耕还林等生态工程的重要实施地区和植被恢复明显的典型省级区域,地跨毛乌素沙地、黄土高原、关中平原、秦巴山地,地貌类型复杂多样,南北自然条件迥异,水土流失、沙化等环境问题主

导因素不同^[17]。不同地区的植被覆盖空间差异显著,对气候因子的响应也有所不同,因此多年来对陕西省植被变化及其影响的研究备受关注。但已有研究多以全省或单独以毛乌素沙地、黄土高原、关中平原、秦岭山区等作为研究区^[17-22],基于分区,对陕西不同区域的综合对比分析未开展深入研究,且多从降水与气温均值的角度加以分析,未能进一步分离量化各气候因子的贡献。

鉴于此,本研究基于 MODIS NDVI、年均高温、年均低温、年均温、年总降水量等数据,运用 Theil-Sen Median 趋势、偏相关分析、地理探测器等方法,结合不同地貌单元生态系统特征,分离相关因素,探究 2000—2020 年期间陕西省植被 NDVI 时空变化及其与气候因子的时间响应关系。旨在明确陕西省近 20 年来植被 NDVI 的变化趋势,该种趋势是否在不同地貌单元存在显著变化? 植被对气候因子如何响应,这种关系在不同地貌单元上有何规律和差异?

1 研究区与研究数据

1.1 研究区概况

陕西省位于 105°29′—111°15′E, 31°42′—39°35′N, 总面积 $2.056 \times 10^5 \text{ km}^2$, 处于长江和黄河中游地区, 主要有高原、山地、平原和盆地等多种地形, 地势南北高、中间低。陕西省南北气候差异较大, 横跨 3 个气候带, 陕北北部长城沿线属中温带气候, 陕南属北亚热带气候, 关中及陕北大部分属暖温带气候(图 1)。全省年平均气温为 9~16℃, 自南向北、自东向西递减, 全省年平均降水量为 340~1 240 mm, 降水量南多北少, 陕南为湿润区, 关中为半湿润区, 陕北为半干旱区。全省植被类型复杂多样, 分布差异大, 其中陕北长城以北分布沙生植物, 植被稀疏, 长城以南的榆林南部及延安北部生长有灌木等植被, 水土流失严重, 植被覆盖较低, 北山山脉分布有落叶阔叶林, 植被覆盖较高。关中地区分布大量农业植被, 城市发展导致植被覆盖较低。陕南秦岭主体及其以北分布着以暖温带落叶阔叶林为主的植被, 巴山地区分布有常绿阔叶林和落叶阔叶林, 植被覆盖状况好。

1.2 研究数据

NDVI 数据基于 MODIS NDVI MOD13Q1 数据产品 (<https://adsweb.nascom.nasa.gov/>), 通过裁剪、镶嵌、投影变换、重采样, 使用最大合成法计算出逐月植被 NDVI, 将一年内植被 NDVI 最大值数据作为年植被 NDVI 数据, 得到 2000—2020 年陕西省 1 km 分辨率植被 NDVI 数据。年均高温、年均低温、年均温及年总降水量数据来源于国家科技基础条件

平台—国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>)。该数据是根据 CRU 发布全球 0.5° 气候数据以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据, 通过 Delta 空间降尺度方案在中国地区降尺度生成, 并用 496 个独立气象观测点数据进行验证得到, 经格式转换、裁剪、投影变换得到 2000—2020 年陕西省 1 km 分辨率的年均高温、年均低温、年均温及年总降水量数据, 其中年均高(低)温定义为研究区域内每个 1 km×1 km 栅格像元一年内每日最高(低)气温的均值。

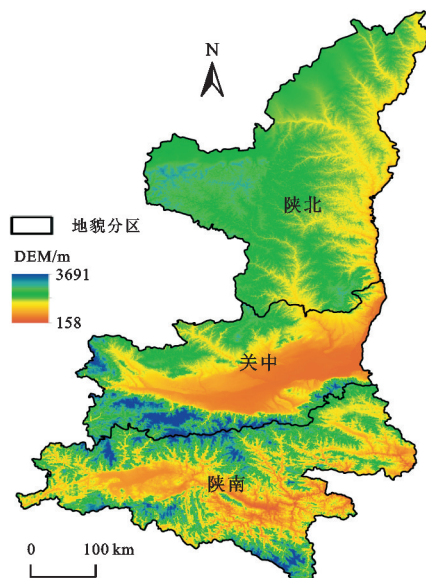


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2 研究方法

(1) Theil-Sen Median 趋势分析 + Mann-Kendall 检验。Theil-Sen Median 趋势分析是一种非参数统计方法, 其优点不需要样本遵循特定分布, 计算效率高且对异常值不敏感, 不会降低其准确性, 具有避免测量误差或异常数据的强大能力。对不同线性回归模型的比较表明, 该方法在小样本的情况下具有显著优势^[23]。

$$S = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (1)$$

式中: S 为植被变化的趋势; Median 为中值函数; x_i, x_j 为第 i 和第 j 年的 NDVI 数据。当 $S > 0$ 时, NDVI 表现为上升趋势, 反之则呈下降趋势。Mann-Kendall (MK) 检验是一种非参数检验, 这意味着不需要事先假设数据的统计分布, 归一化统计量 Z 主要用于测试时间序列的趋势和显著性, 一般认为 $|Z| \geq 1.96$, 即通过了显著性检验; 公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{t-1} \sum_{j=i+1}^t \text{sign}(\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) \quad (2)$$

$$\text{sign}(\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) = \begin{cases} -1 & \text{if}(\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) < 0 \\ 0 & \text{if}(\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) = 0 \\ 1 & \text{if}(\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{var}(S) = \frac{t(t-1)(2t-5)}{18} \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

(2) 偏相关分析。本研究采用偏相关分析方法研究年均高温、年均低温、年均温及年总降水量与 NDVI 之间的偏相关程度,主要是将控制其中 3 个气候因子,只分析一个气候因子与 NDVI 的相关程度,偏相关系数的正负表示年均高温、年均低温、年均温及年总降水量与 NDVI 间的正负相关性^[24]。

$$r_{ij,xyz} = \frac{r_{iz,xyz} - r_{iz,xy}r_{jz,xyz}}{\sqrt{(1-r_{iz,xy})^2 - (1-r_{jz,xy})^2}} \quad (6)$$

式中: $r_{ij,xyz}$ 为偏相关系数, $r_{ij,xyz} > 0$,则呈正相关,

$r_{ij,xyz} < 0$,则呈负相关。

(3) 地理探测器。地理探测器(Geodetector)是一个用于空间数据分析的开源统计模型(<http://www.geodetector.cn/>),是通过空间分层异质性观点来确定两个变量空间分布的相似性^[15]。地理探测器由因子探测、交互探测、风险探测和生态探测组成,本研究主要使用前两种功能。

因子探测用于检测各影响因素对 NDVI(Y)的空间异质性的解释程度。

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (7)$$

式中: $h=1,2,\dots,p$ 。 L 是变量(Y)或因子(X)的分层; N_h 和 N 分别是层 h 和整个区域的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是分层 h 和整个区域的(Y)值的方差。 q 的取值范围为 $[0,1]$ 。 q 的值越大,因子(X)对变量(Y)的解释力就越强, $q=0$ 意味着两者无关。

因子交互用来识别两因子是否对因变量 Y 有交互作用,即这两个因子共同作用时,是增加还是减少对 NDVI 的解释力,交互类型见表 1。

表 1 地理探测器因子交互类型

Table 1 Types of geodetector factor interactions

交互类型	描述
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$
单因子非线性削弱	$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$
独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

3 结果与分析

3.1 NDVI 时空变化分析

3.1.1 NDVI 空间分布特征 由图 2 可知,陕西省多年 NDVI 为 0.02~0.96,均值为 0.71。参照李霞等^[16]研究,本研究采用等间隔法,将 NDVI 空间分布划分为 5 个等级:低植被覆盖(0~0.2)、中低(0.2~0.4)、中植被覆盖(0.4~0.6)、中高植被覆盖(0.6~0.8)、高植被覆盖(0.8~1.0)。全省植被覆盖南高北低,呈现由南部向北部地区逐渐递减。陕南秦巴地区植被覆盖主要以高植被覆盖为主,占比 88%,其次中高植被覆盖占比 11.6%,中等以下植被覆盖占比 0.4%。关中地区植被覆盖以中高植被覆盖为主,占比 50%,其次高植被覆盖占比 38.9%,中等及以下植被覆盖占比 11.1%。陕北植被覆盖低,以中等植被覆盖为主,占比 50.4%,其次高植被覆盖占比 12.8%,中低及以下植被覆盖占比 14.3%。

全省高植被覆盖区占比 44.9%,主要集中分布在

秦岭南麓勉县—留坝—太白南—佛坪—洋县—宁陕—镇安—旬阳—白河一带和巴山北麓南郑—镇巴—紫阳—岚皋—平利—镇坪一带,在黄陵和黄龙等地呈零散分布,中高植被区占比 26.3%,主要分布在北山山脉一带、宝鸡西北部、秦岭与关中交界一带、秦岭东部;中等植被覆盖区占比 22.9%,主要分布陕北长城以南,北山山脉以北;中低及低植被覆盖区占比 5.9%,主要在陕北长城沿线以北以及西安城区。

3.1.2 NDVI 时空动态变化特征 如图 3A 所示,总体来看,2000—2020 年陕西省 NDVI 在时间上呈现出波动增加的趋势,增加速率为 5.9%/10 a,NDVI 在 0.62~0.76 之间波动,各分区在 NDVI 增加速率上,陕北地区>关中地区>陕南地区,其中陕北地区 NDVI 增加速率为 9.7%/10 a,NDVI 在 0.41~0.64 之间波动,关中地区增加速率为 3.6%/10 a,NDVI 在 0.67~0.79 之间波动,陕南地区增加速率为 3.1%/10 a。

2000—2020 年陕西省 NDVI 在空间上整体以上升为主,变化率在 -0.040~0.043/a 之间,平均趋势

为 0.006/a(图 3B),各分区变化趋势为陕北(0.01/a) > 关中(0.004/a) > 陕南(0.003/a),主要因为陕北地区植被覆盖基数相对较差,近年来的植被恢复措施效果明显。关中地区城市化扩张迅速、农业发展良好等多种因素共同导致 NDVI 发生变化。陕南地区植被覆盖现状较好,相比而言 NDVI 变化速率较慢(图 3A)。全省有 93.3% 的区域 NDVI 呈现增长趋势,其中陕北增长区域占比最大(42.2%),其次为陕南(34.2%)、关中(23.6%);全省 6.7% 的区域 NDVI 呈减少趋势,以关中地区为主(74.7%),其次为陕南(18.7%)、陕北(6.6%)。同时各分区均呈现整体增长的趋势,增长区域陕北(98.9%) > 陕南(96.4%) > 关中(82.4%),关中地区减少区域在各分区中最大(17.6%),其次为陕南(3.6%)、陕北(1.1%)。

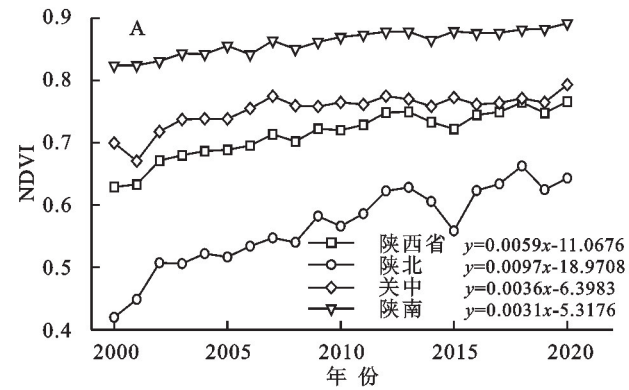


图 3 陕西省及各分区植被 NDVI 时间变化(A)、空间变化趋势(B)及显著性(C)
Fig. 3 Temporal variation (A), spatial trend (B) and significance (C) of vegetation NDVI in Shaanxi Province and each subregion in Shaanxi Province and each subzone

结合 MK 显著性检验结果,如图 3C 所示,将 NDVI 趋势变化划分为严重退化、轻微退化、稳定不变、轻微改善、明显改善 5 个等级。全省植被显著改善区域比例达 67%,主要分布在陕北和陕南地区,其中陕北占显著改善区域的 46%,其次为陕南(33.3%)、关中(20.7%),这与陕北大力实施退耕还林还草、植被造林等生态恢复工程有着密切的关系,而秦巴山地涵养水源功能较好,对气候适应性较强,受人类活动破坏影响较小,随着退耕还林及天保工程的逐步实施,植被在不断改善,区域生态恢复取得明显效果。轻微改善区域占比 10.4%,主要零散分布在陕北地区的定边关中、渭河沿岸以及陕南秦岭南麓各县,其中关中地区占轻微改善区域比例最大(40.6%),其次为陕南(38.8%),陕北(20.6%),而植被显著退化及轻微退化区域分别占 18.2%,2.5%,主要在关中地区(分别占比 80%,73.4%),集中分布在西安、渭南、富平、郿邑、泾阳、眉县等地,这些区域人口密度较大,生

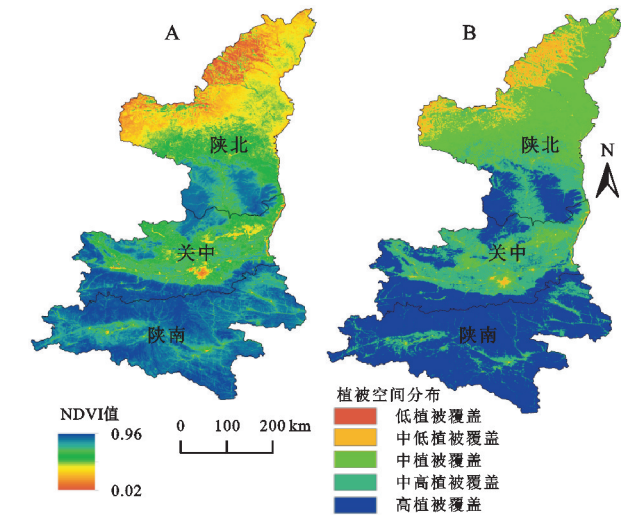
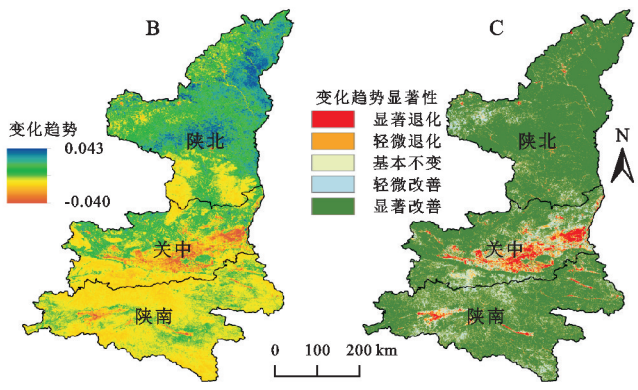


图 2 陕西省多年植被 NDVI 值及植被空间分布
Fig. 2 Multi-year vegetation NDVI values and spatial distribution of vegetation in Shaanxi Province



产活动较为频繁,城市建设迅速,大量的农业用地被占用,使得植被覆盖度降低,汉中及安康等城区是陕南人口密度大、活动频繁的地区,植被也有所退化。

3.2 气候因子时空变化分析

3.2.1 气候因子时间动态特征 如图 4 所示,2000—2020 年陕西省气温、降水在时间上整体呈缓慢变化趋势,气候有暖湿化的可能,2000—2012 年全省及各分区年均高温和年均温变化曲线大致相似,2014—2020 年年均高温、年均低温及年均温变化曲线大致相似,在 2013 年年均高温突降,而年均温反增,年均低温稍增,2013 年前年均温和年均高温可能关联性较强,而 2013 年以后年均温和年均高温、年均低温关系均较强。整个研究期内全省年均高温变化速率为-0.042℃/10 a,年均低温变化速率为 0.09℃/10 a,表现为陕南>关中>陕北;年均温变化速率为 0.039℃/10 a,表现为关中>陕北>陕南;年总降水量变化速率为 5.98 mm/10 a,表现为陕北>陕南>关中。

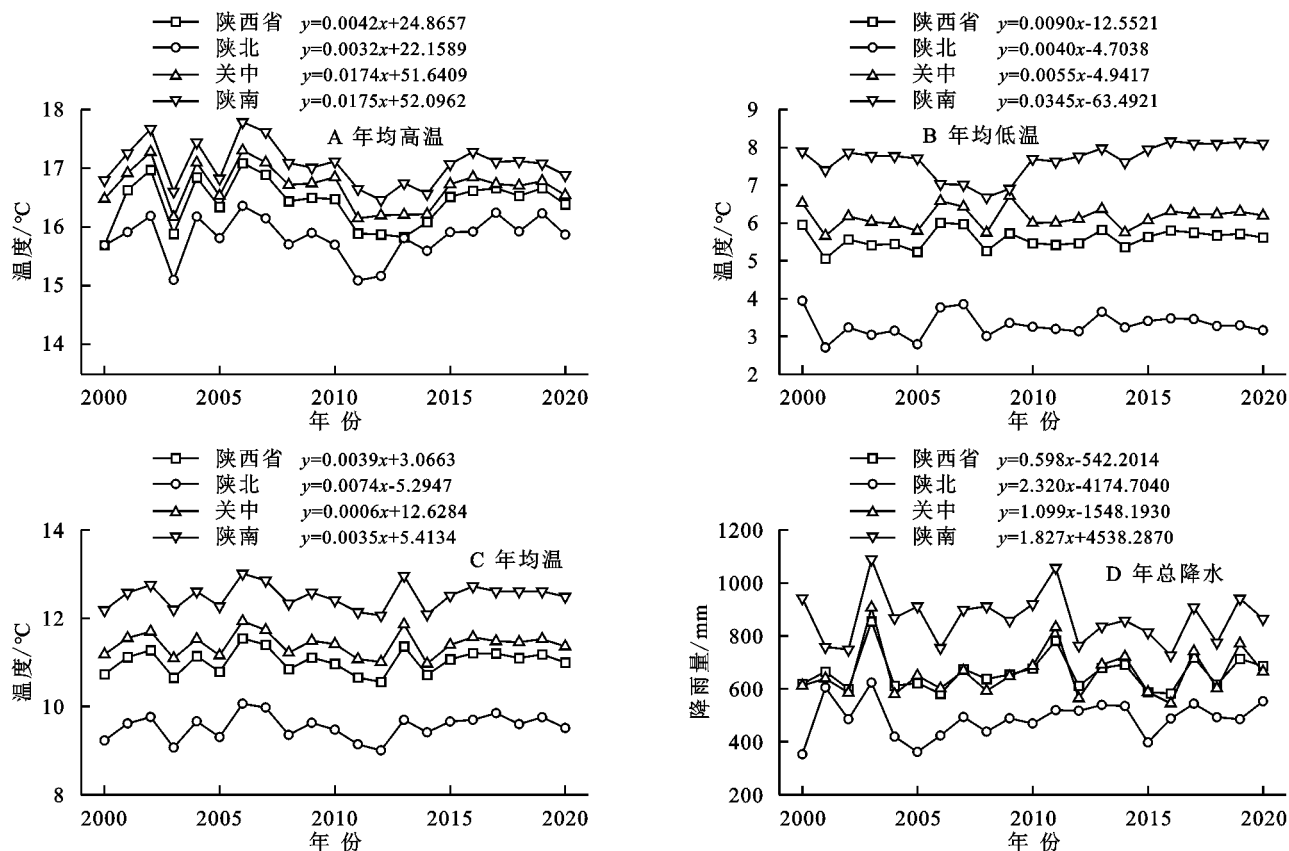


图4 陕西省及各分区年均高温(A)、年均低温(B)、年均温(C)及年总降水(D)时间变化趋势

Fig. 4 Temporal trends in mean annual high temperature (A), mean annual low temperature (B), mean annual temperature (C) and total annual precipitation (D) in Shaanxi Province and the sub-regions

3.2.2 气候因子空间分布及变化趋势 3种气候因子高值区在空间分布上较为一致,主要分布在秦岭南麓及关中地区,主要以秦岭为界,低值区主要分布在秦岭地区和陕北地区(图5A,5D,5G)。对3种气温因子分别进行趋势分析,全省年均高温变化趋势在 $-0.010\sim 0.040^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 之间,75.2%的区域年均高温呈现降低趋势,主要分布在陕北延安西部、关中地区以及陕南汉中盆地等地,通过显著性检验的区域零散分布在秦岭西部及南麓。24.8%的区域呈现升高趋势,主要分布在陕北榆林东部及北部和定边等地,且年均高温升高区域基本全部通过显著性检验(图5B,5C)。全省年均低温变化趋势在 $-0.040\sim 0.051^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 之间,63.7%的区域年均低温呈现升高趋势,但仅有秦岭西南部通过了显著性检验。36.3%的区域年均低温呈现降低趋势,主要分布在延安及关中地区西部,但显著性不强(图5E,5F)。全省年均温变化趋势在 $-0.05\sim 0.043^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 之间,59.1%的区域年均温呈现降低趋势,主要分布在延安及关中地区西部,但显著性不强,41.95%的区域年均温呈现上升趋势,主要分布在榆林东部及北部和定边等地,显著性不强(图5H,5I)。

全省年总降水量与NDVI分布相似,陕南地区最高,由南向北逐渐降低,陕北降水最少,主要由于陕北主要为

黄土高原、毛乌素沙地等,地处干旱半干旱区,全年干旱少雨。对其进行趋势分析,全省变化趋势在 $-5.867\sim 5.566\text{mm}/\text{a}$ 之间,70.1%的地区年总降水量呈现出增加的趋势,29.8%的区域年总降水量呈现出减少的趋势,主要为秦岭地区,但均不显著(图5J,5K,5L)。

3.3 植被NDVI对气候因子的响应

3.3.1 植被NDVI与气候因子偏相关分析 不同地区水热条件不同,植被变化存在空间差异,本文将年均高温、年均低温、年均温、年总降水量作为自变量,NDVI作为因变量,对其进行偏相关分析。如图6A所示,NDVI与年均高温的偏相关系数在 $-0.95\sim 0.84$ 之间。全省及各分区NDVI与年均高温整体呈负相关,全省占比为83.8%,各分区占比为陕南(88.3%)>陕北(87.0%)>关中(74.3%)。全省16.2%的区域NDVI与年均高温呈正相关,分布在定边、榆阳、延长、吴堡、铜川、渭南、咸阳、宝鸡、汉中等地。

全省及各分区NDVI与年均低温、年均温及年降水整体呈正相关(图6B、图6C、图6D)。其中NDVI与年均低温的偏相关系数在 $-0.82\sim 0.93$ 之间,全省呈正相关的区域占比为68.2%,各分区占比为陕南(86.3%)>关中(74.5%)>陕北(50.2%),全省与年均温负相关区域占比31.8%;NDVI与年均温的偏

相关系数在 $-0.81 \sim 0.89$ 之间。全省呈正相关的区域占比 56.1%，各分区占比为陕北(85.1%)>关中(44.1%)>陕南(31.3%)，集中分布在陕北、关中北部。全省与年均温负相关区域占比 43.9%；NDVI 与年总降水量的偏相关系数在 $-0.81 \sim 0.84$ 之间。全

省及呈正相关的区域占比为 56.5%，各分区占比为陕北(83.1%)>关中(47.1%)>陕南(32.5%)，集中分布在陕北北部及东部、关中部及北部等。全省与年总降水量呈负相关区域占比 43.5%，集中分布在黄土高原中部。

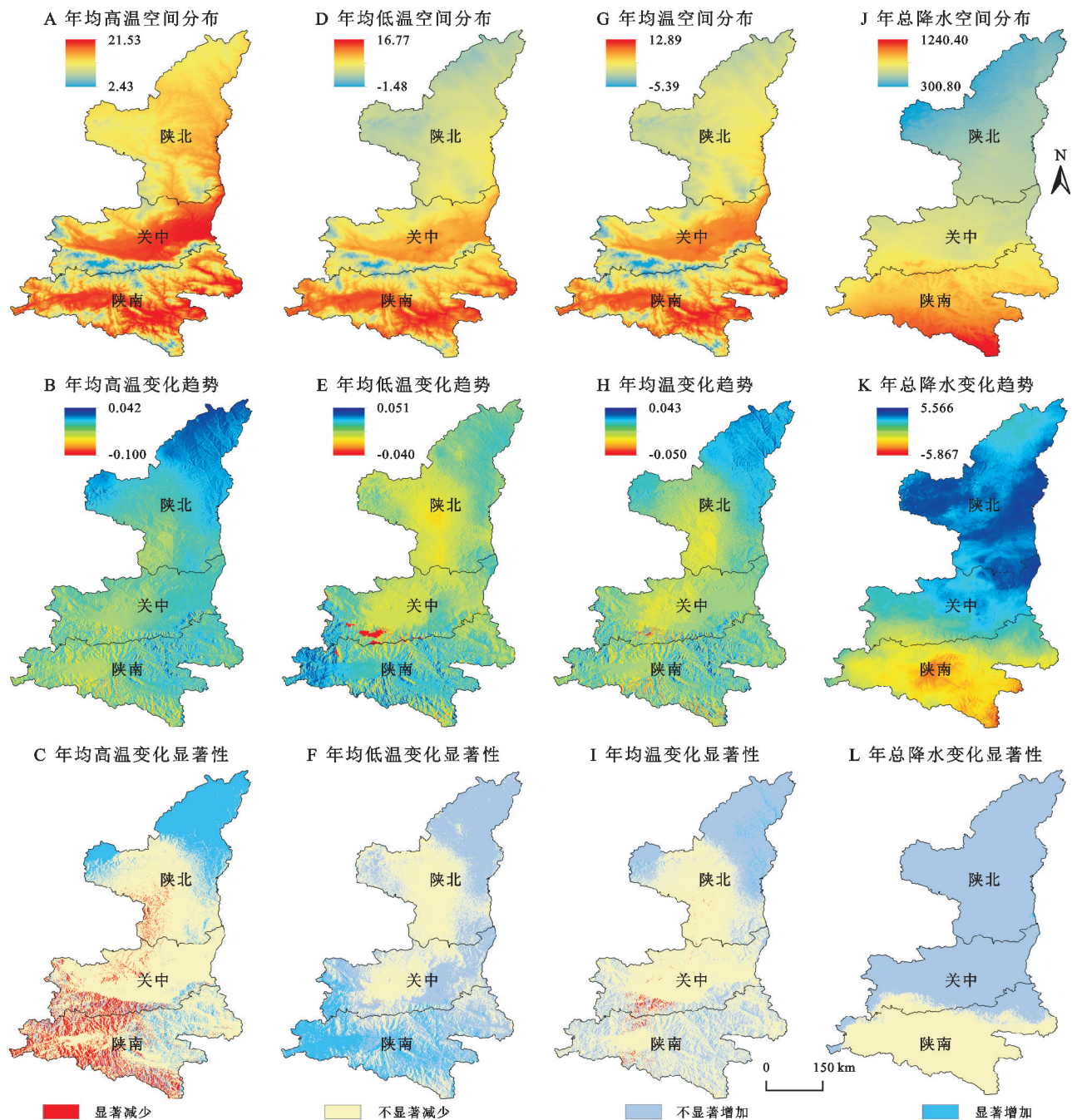


图 5 陕西省年均高温(A,B,C)、年均低温(D,E,F)、年均温(G,H,I)及年总降水(J,K,L)空间分布及变化趋势

Fig. 5 Spatial distribution and trends of annual average high temperature (A, B, C), annual average low temperature (D, E, F), annual average temperature (G, H, I) and annual total precipitation (J, K, L) in Shaanxi Province

3.3.2 NDVI 对降水和气温的响应 地理探测器单因子探测结果显示(表 2),4 种气候因子年均高温(X_1)、年均低温(X_2)、年均温(X_3)、年总降水量(X_4)对植被 NDVI 的贡献(q 值)存在明显差异,不同地区的 q 值也不相同。陕西省年总降水量的贡献最大($q=0.778$),其次为年均低温、年均高温、年均温。陕北地区的各因子贡献度与陕西省类似,年总降水量贡献最大($q=0.798$),然而在关中地区,年均高温对 NDVI 的贡献最大($q=0.650$)。其次为年均温、年均低温、年总降水量,对于陕南地区,年均高温的贡献最大($q=0.455$),其次为年

均温,年均低温和年总降水量的贡献较小,且未通过显著性检验($p<0.05$)。

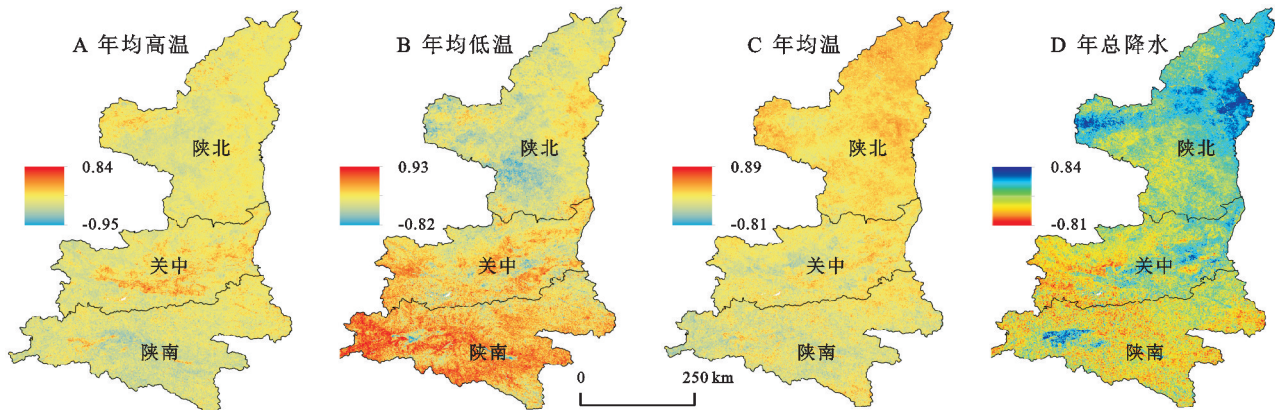


图 6 陕西省植被 NDVI 和偏相年均高温(A)、年均低温(B)、年均温(C)及年降水(D)偏相关系数

Fig. 6 Partial correlation coefficients of vegetation NDVI and annual average high temperature (A), annual average low temperature (B), annual average temperature (C) and annual total precipitation (D) in Shaanxi Province

因子交互结果显示(表 3),无论是非线性增强还是双因子增强,降水和气温之间交互均强于气温之间交互。对于全省和陕北地区,各交互作用类型相似,年均高温、年均低温、年均温互相交互时,其作用对 NDVI 的影响均为非线性增强,交互作用的贡献大于气温因子各自单独作用时的贡献之和,当年均高温、年均低温、年均温与年总降水量分别交互时,其影响力均为双因子增强,交互作用的贡献均大于各单一因子的贡献。在各交互作用中,年均高温∩年总降水量的影响力最大。全省各交互作用大小为年均高温∩年总降水量(0.866)>年均温∩年总降水量(0.846)>年均低温∩年总降水量(0.829)>年均高温∩年均低温(0.810)>年均低温∩年均温(0.653)>年均高温∩年均温(0.650),气温参与交互增强了降水的贡献。陕北地区各交互作用大小为年均高温∩年总降水量(0.899)>年均温∩年总降水量(0.883)>年均低温∩年总降水量(0.860)>年均高温∩年均低温(0.806)>年均低温∩年均温(0.760)>年均高温∩年均温(0.694)。

陕南地区与全省和陕北地区相反,年均高温、年均低温、年均温彼此交互时,均为双因子增强,即交互作用的贡献均大于各单一因子的贡献,而与年总降水量交互时,为非线性增强,即交互作用的贡献大于各自单独作用时的贡献之和,同样也是年均高温∩年总降水量影响力最大,各交互作用大小为年均高温∩年总降水量(0.617)>年均温∩年总降水量(0.594)>年均低温∩年总降水量(0.586)>年均高温∩年均低温(0.549)>年均高温∩年均温(0.516)>年均低温∩年均温(0.462)。关中地区各因子交互作用影响力均为双因子增强,交互作用的贡献均大于各单一因子的贡献,年均温∩年总降水量影响力最大,各交互作

用大小年均温∩年总降水量(0.748)>年均高温∩年总降水量(0.741)>年均低温∩年总降水量(0.728)>年均高温∩年均低温(0.689)>年均高温∩年均温(0.679)>年均低温∩年均温(0.642)。

表 2 单因子探测结果

Table 2 Single factor detection results			
区域	影响因子	q 值	p 值
陕西省	X_1	0.203	0*
	X_2	0.348	0*
	X_3	0.186	0*
	X_4	0.778	0*
陕北	X_1	0.202	0*
	X_2	0.460	0*
	X_3	0.094	0.004*
	X_4	0.798	0*
关中	X_1	0.650	0*
	X_2	0.524	0*
	X_3	0.614	0*
	X_4	0.467	0*
陕南	X_1	0.455	0.002*
	X_2	0.388	0.284
	X_3	0.422	0*
	X_4	0.121	0.223

注:q 值为因子贡献度,* 为通过 $P<0.05$ 显著性检验。

4 讨论

植被变化是一个长期复杂的动态过程,受自然和人类活动的共同作用。本研究发现,陕西省 NDVI 由南至北逐渐降低,整体以改善为主,陕北最为明显,与已有研究较为一致^[17-20],降水和气温是影响植被生长的主要因素,多年来气候具有暖湿化的趋势,可能

有利于植被生长^[17,25],另外,陕西省及各分区气候与植被 NDVI 变化趋势不同步,一方面,这可能是由于气候变化的影响存在滞后和累计效应^[26],另一方面,近年来全省大力实施退耕还林还草、天然林保护等生态工程,在一定程度上增加了植被 NDVI^[7,27]。随着“双碳”目标的实施,政府逐步开展国土科学绿化工作,大力进行国家储备林及碳汇林建设,未来植被改善趋势会进一步凸显。

表 3 多因子交互结果
Table 3 Multi-factor interaction results

区域	交互作用	交互值	影响力
陕西省	$X_1 \cap X_2$	0.810	非线性增强
	$X_1 \cap X_3$	0.650	非线性增强
	$X_1 \cap X_4$	0.866	双因子增强
	$X_2 \cap X_3$	0.653	非线性增强
	$X_2 \cap X_4$	0.829	双因子增强
	$X_3 \cap X_4$	0.846	双因子增强
陕北	$X_1 \cap X_2$	0.806	非线性增强
	$X_1 \cap X_3$	0.694	非线性增强
	$X_1 \cap X_4$	0.899	双因子增强
	$X_2 \cap X_3$	0.760	非线性增强
	$X_2 \cap X_4$	0.860	双因子增强
	$X_3 \cap X_4$	0.883	双因子增强
关中	$X_1 \cap X_2$	0.689	双因子增强
	$X_1 \cap X_3$	0.679	双因子增强
	$X_1 \cap X_4$	0.741	双因子增强
	$X_2 \cap X_3$	0.642	双因子增强
	$X_2 \cap X_4$	0.728	双因子增强
	$X_3 \cap X_4$	0.748	双因子增强
陕南	$X_1 \cap X_2$	0.549	双因子增强
	$X_1 \cap X_3$	0.516	双因子增强
	$X_1 \cap X_4$	0.617	非线性增强
	$X_2 \cap X_3$	0.462	双因子增强
	$X_2 \cap X_4$	0.594	非线性增强
	$X_3 \cap X_4$	0.586	非线性增强

长城沿线和毛乌素沙地东南部植被表现出与高温负相关,与低温、均温和降水呈正相关,而陕北中南部则与低温和高温呈负相关,一方面,这些区域同属于干旱半干旱区,降水相对较为匮乏,植被对降水的需求大,降水成了制约植被生长的重要因素,这与前人研究一致^[25,28]。另一方面,气候寒冷,积温不足,植被生长需要一定的热量条件,气温的上升,尤其是低温的上升,对该地区的植被生长起到了促进作用^[20,29],然而,植被生长有最适范围,超过最适范围会进一步加剧地区土壤蒸发和植被蒸腾,从而造成地表缺水,水土流失加剧,对

降水量稀少的干旱半干旱地区的植被生长造成不利作用^[26]。但是子午岭一带山脉海拔较高,本身植被覆盖相对较高,涵养水源能力较好,与年总降水量呈现微弱的负相关,适宜的光照和气温促进植物光合作用,而温度过高或过低均会抑制植被生长^[18,27]。在气候因子中,降水对植被的影响最强,并且与气温尤其是与高温交互显著提高了对植被的作用,这与贺军奇等^[25]在毛乌素沙地东南部的研究有所差异,可能是因为研究区域以及研究时间尺度不同。

秦岭及以南大部分地区降水量多,导致了植被对降水的敏感性降低。一般而言,对于大多数区域,太阳日照对植被产生影响,一方面降水量的增加意味着日照减少,光合作用减弱,在一定程度上抑制了植被的生长。同时该区域海拔高,温度较低,热量成为植被生长的主要限制因素,温度较低时,植被生长不利,温度升高,植被物候提前,生长季延长,植被长势变好与温度继续升高加剧了植被蒸腾,而且植被具有调节温度的作用,植被的增加又会降低局部地表温度,反过来抑制了植被生长^[30]。因子探测与交互结果显示,年均高温对陕南植被 NDVI 的贡献最大(抑制作用),当年均高温和年总降水量的交互时更是增强了年均高温的影响,但是陕南的植被 NDVI 呈现增加趋势,说明气候因素对该地区的植被 NDVI 影响有限,可能是一些生态工程或措施如退耕还林、森林抚育等促进了区域植被生长^[11]。而关中等地农业发展较好,农业灌溉较为普遍,对天然降水的响应有所减弱,气温因素对植被 NDVI 的影响更大,与已有研究类似^[21],同时因子探测结果也显示关中气温的贡献大于降水,并且降水和气温的交互增强了气温的影响力。

尽管陕西省南北差异较大,不同地区的气候对植被的影响程度有所不同,但人类活动对于植被的影响也不容忽视。在人类活动和气候因素的共同作用下,陕西省植被发生了显著改变,一些生态政策的实施大大改善了植被状况,然而同时也要注意的是,生态工程实施改善植被的同时,是否也会对当地气候与水资源产生影响^[18],因地制宜,科学绿化的生态修复显得尤为重要。本文在分析植被 NDVI 变化趋势的基础上,通过偏相关分析以及地理探测器量化了陕西省不同地区植被 NDVI 对年均高温、年均低温、年均温、年总降水量的响应及其贡献大小,但对人类活动的影响考虑不足,综合考虑自然和人类因素,将代表人类活动的因子纳入研究,量化不同地区不同植被类型 NDVI 自然和人类活动贡献及其交互作用,是值得进一步研究的方向。

5 结论

(1) 研究期陕西省植被 NDVI 均值为 0.71, 呈南北低, 各分区植被覆盖情况不同, 陕南植被覆盖最好, 以高植被覆盖为主, 关中次之, 以中高植被覆盖为主, 陕北植被覆盖最差, 以中等植被覆盖为主。

(2) 研究期陕西省植被 NDVI 随时间波动增加, 速率为 5.9%/10 a, 各分区速率大小为陕北>关中>陕南。植被 NDVI 增加区域占比 93.3%, 其中显著改善占比 67%, 各分区占比陕北>陕南>关中。

(3) 研究期陕西省气候在时间上整体缓慢波动变化, 各分区变化速率为陕南>关中>陕北。空间上, 气温山低平原高, 降水南高北低, 整体呈现年均高温及年均温降低、年均低温及年总降水量增加。

(4) 研究期陕西省及各分区植被 NDVI 与年均高温整体呈负相关, 全省占比 83.8%, 各分区为陕南>陕北>关中。全省及各分区 NDVI 与年均低温、年均温、年总降水量整体呈正相关, 全省分别占比 68.2%, 56.1%, 56.6%, 各分区年均低温正相关占比为陕南>关中>陕北, 年均温及年总降水正相关占比为陕北>关中>陕南。

(5) 研究期陕西省及各分区气候因子对植被 NDVI 的贡献不同, 因子相互作用也存在差异。年总降水量对全省及陕北 NDVI 贡献最大, 年均高温对关中和陕南 NDVI 贡献最大。降水与年均高温、年均温的交互是影响 NDVI 的主要作用, 全省、陕北及陕南为年均高温 \cap 年总降水量, 关中为年均温 \cap 年总降水量。

参考文献(References):

- [1] Zhou L, Tian Y, Myneni R B, et al. Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade[J]. *Nature*, 2014, 509(7498): 86-90.
- [2] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [3] Gottfried M, Pauli H, Futschik A, et al. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(2): 111-115.
- [4] Tao S, Kuang T T, Peng W P, et al. Analyzing the spatio-temporal variation and drivers of NDVI in upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015: a case study of Yibin City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 5029-5043.
- [5] Huang S, Tang L, Hupy J P, et al. Correction to: Commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing[J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32: 2719.
- [6] Shi S, Yu J, Wang F, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over multiple time scales on the Loess Plateau[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 755: 142419.
- [7] Ge W, Deng L, Wang F, et al. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 773: 145648.
- [8] Wang X, Piao S, Ciais P, et al. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(4): 1240-1245.
- [9] Gao W, Zheng C, Liu X, et al. NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us Sandy Land, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108745.
- [10] 杨延征, 赵鹏祥, 郝红科, 等. 基于 SPOT-VGT NDVI 的陕北植被覆盖时空变化[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1897-1903.
- Yang Y Z, Zhao P X, Hao H K, et al. Spatiotemporal variation of vegetation in northern Shaanxi of Northwest China based on SPOT-VGT NDVI[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1897-1903.
- [11] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 425-438.
- Deng C H, Bai H Y, Gao S, et al. Spatial-temporal Variation of the Vegetation Coverage in Qinling Mountains and Its Response to Climate Change and Human Activities[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(3): 425-438.
- [12] Gu Z, Duan X, Shi Y, et al. Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 54-64.
- [13] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61-78.
- [14] Huang S, Zheng X, Ma L, et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to vegetation cover variations based on GA-SVM model[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124687.
- [15] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.

- Wang J F, Xu C D. Geodetectors: principles and prospects[J]. *Journal of Geography*, 2017, 72(1): 116-134.
- [16] 李霞, 张国壮, 陈永昊, 等. 农牧交错带辽河流域 2010—2019 年植被覆盖变化及驱动因素分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(22): 63-72.
- Li X, Zhang G Z, Chen Y H, et al. Vegetation cover change and driving factors in the agro-pastoral ecotone of Liaohe River Basin of China from 2010 to 2019[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2022, 38(22): 63-72.
- [17] 岳辉, 刘英. 近 15 年陕西省植被时空变化与影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(2): 314-323.
- Yue F, Liu Y. Analysis of spatial and temporal changes in vegetation cover and influencing factors in Shaanxi Province in the last 15 a[J]. *Geography of Arid Regions*, 2019, 42(2): 314-323.
- [18] 逮金鑫, 周荣磊, 刘洋洋, 等. 黄土高原植被覆被时空动态及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 211-219.
- Lu J X, Zhou R L, Liu Y Y, et al. Temporal and spatial dynamics of vegetation cover on the Loess Plateau and its influencing factors[J]. *Soil and water conservation research*, 2023, 30(2): 211-219.
- [19] 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 M, Geng G, Wang T, 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]. *Soil and water conservation research*, 2023, 30(2): 238-246.
- [20] 高滢, 孙虎, 徐崑尧, 等. 陕西省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 1022-1033.
- Gao Y, Sun H, Xu R Y, et al. Temporal and spatial variation of vegetation cover and its response to extreme climate in Shaanxi Province [J]. *Journal of Ecology*, 2022, 42(3): 1022-1033.
- [21] 王治国, 白永平, 车磊, 等. 关中平原城市群植被覆盖的时空特征与影响因素[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(4): 1041-1050.
- Wang Z G, Bai Y P, Che L, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of vegetation coverage in urban agglomeration of Guanzhong Plain[J]. *Geography of Arid Regions*, 2020, 43(4): 1041-1050.
- [22] 贺军奇, 魏燕, 高万德, 等. 毛乌素沙地东南缘植被 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(5): 1523-1533.
- He J Q, Wei Y, Gao W D, et al. Temporal and spatial variation of vegetation NDVI and its response to climatic factors in the southeastern margin of Mu Us Sandy Land[J]. *Geography of Arid Regions*, 2022, 45(5): 1523-1533.
- [23] Mo K L, Chen Q W, Chen C, et al. Spatiotemporal variation of correlation between vegetation cover and precipitation in an arid mountain-oasis river basin in northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 138-147.
- [24] Zhong R, Wang P, Mao G, et al. Spatiotemporal variation of enhanced vegetation index in the Amazon Basin and its response to climate change[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2021, 123: 103024.
- [25] 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.
- [26] Chu H, Venevsky S, Chao W, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 650: 2051-2062.
- [27] 张乐艺, 李霞, 冯京辉, 等. 2000—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(5): 276-286.
- Zhang L Y, Li X, Feng J H, et al. Spatio-temporal Changes of NDVI in Yellow River Basin and Its Dual Response to Climate Change and Human Activities During 2000—2018 [J]. *Soil and Water Conservation Bulletin*, 2021, 41(5): 276-286.
- [28] Alba G G, Eugenio D P, Agustin R, et al. Both altitude and vegetation affect temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in Mediterranean high mountain soils[J]. *Geoderma*, 2015, 237: 1-8.
- [29] Dietrich C C, Kreyling J, Jentsch A, et al. Intraspecific variation in response to magnitude and frequency of freeze-thaw cycles in a temperate grass [J]. *AoB Plants*, 2018, 10(1): plx068.
- [30] 齐贵增, 白红英, 赵婷, 等. 秦岭陕西段南北坡植被对干湿变化响应敏感性及其空间差异[J]. *地理学报*, 2021, 76(1): 44-56.
- Qi G Z, Bai H Y, Zhao T, et al. Sensitivity and areal differentiation of vegetation responses to hydrothermal dynamics on the southern and northern slopes of the Qinling Mountains in Shaanxi province [J]. *Journal of Geography*, 2021, 76(1): 44-56.