



气候因素与黄土高原植被的时间滞后关系分析

汪士为 吴伟

Analysis of time lag relationships between climate factors and vegetation on the Loess Plateau

WANG Shiwei, WU Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0557>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2001 – 2020年甘南高原植被变化特征及驱动因素

Characteristics and driving factors of vegetation changes in the Gannan Plateau from 2001 to 2020

草业科学. 2023, 40(9): 2185 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0536>

黄土高原粮草复合生态系统蒸散发变化动态及其与干旱的关系

Dynamics of evapotranspiration and its relationship with drought in a grain–forage compound ecosystem on the Loess Plateau

草业科学. 2024, 41(9): 2025 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0323>

同质园环境下12种锦鸡儿属植物叶片真菌病害影响因素分析

Foliar fungal diseases across 12 *Caragana* species and the underlying factors in a common garden experiment

草业科学. 2024, 41(11): 2612 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0514>

不同温度盐爪爪种子发芽特性和幼苗期耐旱性

Drought tolerance during seed germination and young seedling period of *Kalidium foliatum* under different temperatures

草业科学. 2023, 40(3): 674 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0317>

基于DNDC模型分析降水变化对黄土丘陵区草地生物量和土壤有机碳的影响

Analysis of the response of grassland biomass and soil organic carbon to precipitation changes based on the DNDC model in the loess hilly region

草业科学. 2023, 40(1): 25 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0791>

温度对17种高寒草地植物种子大小与萌发特征关系的影响

Effects of temperature on the relationships between seed size and germination characteristics of seventeen alpine grassland plant species

草业科学. 2023, 40(6): 1487 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0275>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0557

汪士为, 吴伟. 气候因素与黄土高原植被的时间滞后关系分析. 草业科学, 2025, 42(2): 329-339.

WANG S W, WU W. Analysis of time lag relationships between climate factors and vegetation on the Loess Plateau. Pratacultural Science, 2025, 42(2): 329-339.

气候因素与黄土高原植被的时间滞后关系分析

汪士为¹, 吴伟²

(1. 湖北汽车工业学院生态文旅系, 湖北 十堰 442002; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在全球气候变化的背景下, 探讨植被对气候因素的响应, 对于区域生态保护及水土资源的可持续利用具有重要的现实价值。然而以往研究大多关注同时期气象因素和植被指标在区域尺度上的相互反馈, 忽略了植被与气象因素之间的时间滞后效应。为明确植被与气象因素之间的时间滞后效应, 本研究利用归一化植被指数 (MODNDIT/NDVI) 时间序列和温度、降水量数据集, 分析了黄土高原植被对不同气候因素的时间滞后效应, 建立了多元线性回归模型和偏相关模型, 确定了不同植被类型的主要气候驱动因素。结果表明: 1) 黄土高原不同植被类型和不同区域的植被对气候变化的响应方式和时间滞后效应都不同; 2) 考虑时间滞后效应后, 气候因素能够解释黄土高原植被生长 58.20% 的变化, 相对于不考虑时间滞后效应的模型, 这一解释程度提高了 10.00%; 3) 对于黄土高原 MODNDIT/NDVI 在 2000-2018 年期间具有显著变化趋势的区域 ($P < 0.05$), 主要驱动因素是温度。

关键词: 气候变化驱动机制; 时间序列分析; 降水量; 温度; 标准化降水蒸散指数; 时滞效应

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2025)02-0329-11

Analysis of time lag relationships between climate factors and vegetation on the Loess Plateau

WANG Shiwei¹, WU Wei²

(1. Department of Ecology, Culture and Tourism, Hubei University of Automobile Technology, Shiyan 442002, Hubei, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydro Power Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: Against a backdrop of ongoing global climate change, investigating the response of vegetation to climatic factors is of particular practical importance with respect to the preservation of regional ecological services and the judicious utilization of water and soil resources. However, whereas previous studies have focused predominantly on the concurrent interplay between meteorological factors and vegetation indices at a regional scale, few have taken into consideration the effects of the temporal lag between vegetation and meteorological factors. In this study, we used a MODNDIT/normalized difference vegetation index (NDVI) time series, along with temperature and precipitation datasets, to examine the temporal lag effects of different climatic factors on vegetation distributed across the Loess Plateau. In addition to identifying the primary climate-driven factors for distinct vegetation types, we established multivariate linear regression and partial correlation models. We accordingly found that with respect to climate change, different vegetation types and regions across the Loess Plateau are characterized by differing response patterns and temporal lag effects. After accounting for temporal lag effects, we established that climatic factors can explain 58.2% of the observed variation in vegetative growth on the Loess Plateau. Compared with models that do not factor in temporal lag effects, this represents a 10% increase in explanatory power. Furthermore, for regions on the Loess Plateau with significant trends in MODNDIT/NDVI between 2000 and 2018

收稿日期: 2023-10-20 接受日期: 2024-04-27

基金项目: 湖北汽车工业学院博士科研基金项目 (BK202108)

通信作者: 汪士为 (1987-), 男 (满族), 吉林长春人, 副教授, 博士, 主要从事遥感生态研究。E-mail: wangshiwei_1987@qq.com

($P < 0.05$), we identified temperature as the primary driving factor.

Keywords: the driving mechanisms of climate change; time series analysis; precipitation; temperature; standardized precipitation evapotranspiration index; time lag effect

Corresponding author: WANG Shiwei E-mail: wangshiwei_1987@qq.com

全球气候变化已成为 21 世纪最严峻的环境问题之一,引起了全球范围内的广泛关注^[1-2]。气温上升、极端气候事件频繁发生、冰川融化和海平面上升等气候变化迹象不断显现,对人类社会和自然生态系统产生了深远的影响。其中,陆地生态系统作为地球生物多样性和碳储存的重要组成部分^[3],在全球气候变化的背景下扮演着关键角色。因此,深入了解全球气候变化与陆地生态系统之间的复杂相互关系,对于更好地应对气候变化挑战具有至关重要的意义。

黄土高原位于中国的干旱半干旱区域,以其独特的自然景观和生态环境而闻名。然而,近几十年来,全球气候变化已经导致了该地区气温上升、降水模式变化、干旱事件频发等气候特征发生明显变化^[4]。这些气候变化对黄土高原的生态系统产生了深远影响,引发了广泛的学术和政策关注^[5-6]。已有研究表明,气温和降水量等气候要素对黄土高原植被的生长发育影响较为显著^[7]。然而,前述研究主要关注了气候要素对植被变化的直接影响,未充分考虑气候因素对植被的响应滞后。相关研究表明,黄土高原植被变化对气候因素的响应存在显著滞后效应^[8-9]。侯西勇等^[10]研究发现黄河三角洲地区的归一化植被指数 (NDVI) 受降水的显著影响,而当考虑到降水的时间滞后效应时,相关系数呈明显增加的趋势。此外,马雄伟等^[9]研究表明,在黄土高原地区,NDVI 与降水量的关联性明显高于与温度的关联性,且气候因素的影响存在 1 个月的时间滞后效应。因此,更精确地研究气候因素对植被的影响需要充分考虑时间尺度上的滞后效应。

全球范围内,时间滞后效应的研究在生态学、气候科学和地理学等领域已取得一定进展^[11]。但针对黄土高原地区的相关研究,特别是在不同地理背景下时间滞后效应的差异性方面,仍存在一定的研究空白。本研究采用 MODND1T/NDVI (normalized difference vegetation index) 植被遥感数据、同期气象数据以及 ESA CCI-LC (The european space agency

climate change initiative land cover) 植被分类数据,运用 Thornthwaite 模型对黄土高原潜在蒸散发情况进行评估,并利用降水和蒸散发数据计算的标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 来衡量干旱状况^[12]。研究的主要内容分为 3 个部分: 1) 分析 NDVI 与气候参数 (温度、降水量和 SPEI) 之间的统计关系,并考虑潜在的时间滞后效应。2) 基于揭示的时间滞后效应,构建多元线性回归模型,以量化气候参数的综合变化与植被变化之间的关系。3) 建立偏相关模型,以确定不同气候因素对植被响应的作用,进而用于识别 2000—2018 年黄土高原植被变化的驱动因素。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于黄河流域的中游,东西延伸超过 1 000 km,南北纵深达 750 km,总面积达到 64 万 km²,地理位置 100°52′~114°33′ E、33°41′~41°16′ N (图 1)。黄土高原的地理环境相对复杂,南部、西部、北部和东部分别受到秦岭、日月山—贺兰山、银山和太行山的环抱,地形包括亚高原、丘陵、沟壑、冲积平原以及海拔高度各异的盆地^[13]。该地区属于

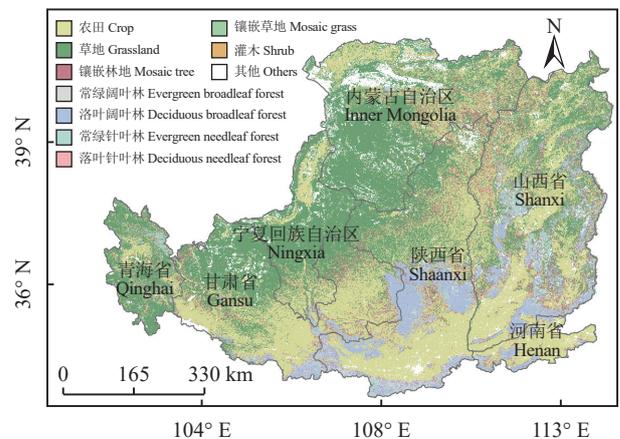


图 1 黄土高原 2000—2018 年植被类型分布

Figure 1 A map showing the distribution of different vegetation types on the Loess Plateau from 2000 to 2018

半干旱大陆性季风气候区, 多年平均气温在 3.6~14.3 °C 波动, 多年平均降水量则介于 100~800 mm。在全球气候变化的背景下, 黄土高原 1961—2010 年的年均气温增幅约为 1.91 °C, 年均降水量减少约为 29.11 mm, 气候波动明显^[14]。该地区的主要植被类型包括草地、农田、灌木、常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林以及各种镶嵌类型植被。

1.2 数据来源

气象数据来自中国气象数据网(网址: <http://cdc.cma.gov.cn>)。获取了 2000—2018 年黄土高原地区 82 个气象站的温度和降水量数据, 并使用 ArcGIS 软件进行了矢量边界裁剪, 以确保数据的一致性和准确性。随后, 采用 Ordinary Kriging 插值以生成与 NDVI 数据图像元素大小和投影相匹配的栅格数据^[15]。

本研究选用美国宇航局 (NASA) 的地球观测系统 (<http://www.nasa.gov>) 提供的 2000—2018 年 MODNDIT/NDVI 数据产品, 共 566 幅影像, 空间分辨率 500 m, 时间分辨率 16 d。利用 python 进行边界裁剪, 对每旬数据进行最大值合成处理以消除云、气溶胶等因素的干扰^[16-17], 获得月尺度的 NDVI 时间序列数据集。

土地覆盖类型数据源自欧洲空间局 (ESA) 的 Global Land Cover 2000 产品, 具有 300 m 的空间分辨率。重采样后以匹配气象和遥感数据的分辨率, 最后得到 12 种土地利用类型, 包括农田、灌木、草地等。选取 2000 年和 2018 年两期土地覆盖类型数据, 使用 ArcGIS 中的 Intersect 工具处理土地覆盖数据, 识别出 2000—2018 年植被类型变化的区域, 并将这些区域与城市、裸地和水体等类型合并, 最终通过重分类得到黄土高原地区植被覆盖类型未变的区域图 (图 1), 用以表示当年植被覆盖类型。

鉴于干旱是一种复杂的自然现象, 研究人员采用了多种指数来简化其计算, 包括帕尔默干旱严重指数 (palmer drought severity index, PDSI)、作物湿度指数 (crop moisture index, CMI) 和标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI)^[18]。然而, 这些指数受到地区差异和适用性的限制。2010 年, Vicente-Serrano 等^[19]引入了标准化降水蒸散发指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI), 该指数基于降水量和蒸散发数据计算, 不仅考虑了温度对蒸发的影响 (类似于 PDSI), 而且适用

于多个空间和时间尺度的比较 (类似于 SPI)。SPEI 的计算方法^[20]如下:

1) Thornthwaite 方法计算潜在蒸散发 (potential evapotranspiration, PET):

$$PET = 16.0 \times \left(\frac{10T_i}{H} \right) \quad (1)$$

式中: T_i 为该月份的平均温度; H 为年度热量指数。

$$H = \sum_{i=1}^{12} H_i = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514} \quad (2)$$

月热量指数 (H_i):

$$H_i = \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514} \quad (3)$$

常数 (A):

$$A = 6.75 \times 10^{-7} H^3 - 7.71 \times 10^{-5} H^2 + 1.792 \times 10^{-2} H + 0.49 \quad (4)$$

2) 逐月降水量与蒸散的差值计算:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (5)$$

式中: D_i 表示降水量与蒸散之间的差值, P_i 为月降水量, PET_i 为月蒸散量。

3) 对 D_i 数据序列进行标准化处理, 并计算相应的 PEI 指数。由于 D_i 序列中可能包含负值, 因此 SPEI 指数采用 3 个参数对数-逻辑分布的概率模型。累积分布函数为:

$$F_{(x)} = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (6)$$

在该过程中, 参数 α 、 β 和 γ 通过线性矩方法进行拟合。

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)}; \\ \beta &= \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2}; \\ \gamma &= \omega_0 - \alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: Γ 为阶乘函数, ω_0 、 ω_1 和 ω_2 表示序列 D_i 加权矩的概率。计算过程如下:

$$\begin{aligned} \omega_s &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i; \\ F_i &= \frac{i - 0.35}{N} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: ω_s 为加权矩, 用于参数拟合; F_i 为经验累积概率, 用于计算加权矩; i 为数据序列中的索引, 表示

第 i 个数据点; N 为计算的月份数。然后, 进行如下累积概率密度的标准化处理。

$$P = 1 - F(x); \quad (9)$$

当累积概率 $P \leq 0.5$ 时,

$$\omega = \sqrt{-2 \ln P};$$

$$SPEI = \omega - \frac{c_0 + c_1 \omega + c_2 \omega^2}{1 + d_1 \omega + d_2 \omega^2 + d_3 \omega^3}. \quad (10)$$

式中: $c_0 = 2.515 517$, $c_1 = 0.802 853$, $c_2 = 0.010 328$; $d_1 = 1.432 788$, $d_2 = 0.189 269$, $d_3 = 0.001 308$ 。

当 $P > 0.5$ 时,

$$P = 1 - P;$$

$$SPEI = -\left(\omega - \frac{c_0 + c_1 \omega + c_2 \omega^2}{1 + d_1 \omega + d_2 \omega^2 + d_3 \omega^3}\right). \quad (11)$$

1.3 研究方法

1.3.1 植被对气候因素和 SPEI 的响应的滞后效应

该研究使用来自温度、降水量和 SPEI 数据作为自变量, MODNDIT/NDVI 数据代表植被活动作为因变量, 以评估它们在不同时间滞后尺度上的依赖关系。先前的研究发现, 植被对气候的响应在月度尺度上的时间滞后通常不超过 1 个季度^[21]; 因此, 本研究考虑了 0~3 个月的时间滞后。NDVI 与气候因素之间的关系如下:

$$\begin{aligned} NDVI &= S_i \times TEM + b; \\ &= S_i \times PRE + b; \\ &= S_i \times SPEI + b. \end{aligned} \quad (12)$$

式中: S_i 是具有 i 个月滞后的回归系数; i 表示 0~3 的滞后时间 (即 0 表示没有时间滞后效应, 1~3 表示 1~3 个月的滞后); $NDVI$ 是从 2000—2018 年的黄土高原 MODNDIT/NDVI 数据的时间序列; TME 、 PRE 和 $SPEI$ 分别是温度、降水量和 SPEI 的时间序列。本研究基于植被生长季统计分析, 即温度高于 0°C 且 $NDVI > 0.2$ 的月份, 因为研究区的大多数植被在冬季受到休眠或积雪的影响。对于每个气候因素, 具有最高确定系数 (R^2) 的滞后月份 (i) 是植被对该气候因素响应的最佳时间滞后期。

1.3.2 气候因素和 SPEI 对植被变化的解释

为了更精确地量化气候变化对植被生长的滞后效应, 本研究采用多元线性回归模型建立了各站点气象因子与植被生长之间的关系, 并通过克里金插

值法分析了其空间分布特征。为了研究黄土高原植被对温度、降水和 SPEI 的响应, 构建了 MODNDIT/NDVI 数据集与这 3 个参数之间的多元线性回归关系。以下是回归关系的计算:

$$NDVI = A \times TEM_x + B \times PRE_y + C \times SPEI_z + D + \theta. \quad (13)$$

式中: $NDVI$ 表示 MODNDIT/NDVI 数据集 (2000—2018 年)。 TEM 、 PRE 和 $SPEI$ 对应于 2000—2018 年的温度、降水和 SPEI 数据集; x 和 y 分别表示植被气候因素 (即温度和降水) 的时间滞后; z 表示植被对 $SPEI$ 的时间滞后; A 、 B 和 C 是回归系数, D 代表一个常数, θ 代表回归误差项。

1.3.3 植被生长的主要气候驱动因素

在相关性分析中, 传统的皮尔逊相关系数仅用于衡量两个变量之间的线性关系, 未能考虑其他变量对这一关系的潜在影响。相比之下, 偏相关系数可以量化一个自变量对因变量的影响, 同时考虑到其他自变量的影响^[22]。为了更精确地评估 NDVI 对温度、降水和 SPEI 的响应, 本研究分析了黄土高原 NDVI 对每个独立因素的反应, 并排除了其他变量的干扰。偏相关系数的计算公式如下:

$$r_{YX_j}^2 = \frac{R_{Y(X_1, L, X_n)}^2 - R_{Y(X_1, L, X_{i-1}, X_{i+1}, L, X_n)}^2}{1 - R_{Y(X_1, L, X_{i-1}, X_{i+1}, L, X_n)}^2}. \quad (14)$$

式中: $r_{YX_j}^2$ 表示 Y 和 X_i 之间的偏相关系数, $R_{Y(X_1, L, X_n)}^2$ 是变量 Y 与变量 X 、 L 、 X_n 之间回归模型的决定系数, $R_{Y(X_1, L, X_{i-1}, X_{i+1}, L, X_n)}^2$ 是变量 Y 与变量 X_1 、 L 、 X_{i-1} 、 X_{i+1} 、 L 、 X_n 之间回归关系的决定系数。在本研究中, Y 代表 MODNDIT/NDVI 数据集, 而 X_1 、 L 和 X_n 分别代表温度、降水和 SPEI 干旱指数。通过偏相关分析的结果, 可以确定哪些因素对黄土高原的植被影响最大。

1.3.4 2000—2018 年黄土高原气候驱动下的植被变化

基于已识别的植被对气候因素的响应, 进一步探讨了在 2000—2018 年黄土高原区域内发生变化的植被的气候驱动因素。因此, 基于 MODNDIT/NDVI 数据、温度、降水、SPEI 数据以及相应的月滞后数据, 评估了 2000—2018 年生长季内每个因素的变化。该研究采用最小二乘法对植被和气候时间序列数据进行线性拟合, 并在显著性水平 0.05 下进行了检验。对黄土高原植被和气候因素显著变化的地区进行了空间比较分析。根据植被对气候的响应特

点, 分析了区域植被显著变化的原因以及主要的气候驱动因素。所有统计分析都是以像素为单位进行, 并在显著性水平 0.05 下进行了检验。

2 结果与分析

2.1 黄土高原植被对气候因素响应的时滞效应

不同植被类型对相同气候因素的滞后效应存在差异, 而不同气候因素对同一植被类型的时滞效应也有所不同。在植被与降水的时滞分析中观察到在黄土高原大部分地区, 当前月份的 NDVI 与降水之间关联最为显著, 且无明显的时间滞后效应 (图 2、图 3)。然而, 黄土高原的中北部地区以及西北部分地区降水量与植被之间存在一定的时滞效应, 其中有多个区域的植被与降水量的响应滞后 1 个月。值得注意的是, 一些森林植被对降水并未表现出显著的时间滞后效应。研究区域内 99.01% 的常绿阔叶林、99.41% 的落叶阔叶林、91.61% 的常绿针叶林以及 100% 的落叶针叶林与降水量均无时滞效应, 相关的平均滞后时间分别为 0.01 个月 (0.10 SD)、0.01 个月 (0.08 SD)、0.09 个月 (0.29 SD) 以及 0.00 个月 (0.00 SD)。而草地对降水量的响应则表现出更明显的时间滞后效应, 其中 43.61% 的区域存在 1 个月的时间滞后, 平均滞后时间为 0.53 个月 (0.62 SD)。此外, 镶嵌林地对降水也呈现出较明显的滞后效应, 其中 29.60% 的区域存在 1 个月的时间滞后, 平均滞后时间为 0.30 个月 (0.47 SD)。灌木与降水量之间存

在多个滞后效应, 其中 47.67% 的区域无时滞效应, 26.82% 的区域存在 1 个月的时间滞后, 14.80% 存在 2 个月的时间滞后, 10.70% 存在 3 个月的时间滞后, 平均滞后时间为 0.89 个月 (1.02 SD)。受人类活动影响较大的农田植被则呈现出不同的时间滞后效应, 其中 69.95% 的区域无时间滞后, 28.74% 的总区域存在 1 个月的时间滞后, 0.50% 的区域存在 2 个月的时间滞后, 0.81% 的区域存在 3 个月的时间滞后, 平均滞后时间为 0.32 个月 (0.53 SD)。

对黄土高原植被与温度的时滞效应分析结果显示, 黄土高原大部分地区的大多数植被与温度的响应存在 1 个月的时间滞后 (图 2、图 3)。这意味着在干旱半干旱区域, 植被发育更多地受到前 1 个月温度的影响, 而不是当月温度的影响。在研究区域中, 农田、镶嵌草地、灌木、草地、镶嵌林地在研究区的 80.25%、86.07%、60.18%、82.67% 和 90.54% 的区域表现出对温度具有 1 个月的时滞效应, 平均滞后时间分别为 0.84 (0.45 SD)、0.93 (0.39 SD)、1.20 (0.73 SD)、和 1.06 (0.50 SD) 个月。

最后, 根据黄土高原植被对 SPEI 响应的时滞效应研究, 观察到黄土高原区域内 SPEI 与植被的响应均存在不同时间尺度的滞后效应 (图 2、图 3)。这表明 SPEI 对黄土高原植被产生显著影响。这可能是因为黄土高原位于中国干旱和半干旱区, 气温升高导致土壤水分蒸发加速, 从而增加了干旱的发生, 进而影响了植被的生长和发育。农田对 SPEI 的响应具有不同的滞后时间, 其中无时滞区域占总面积的 17.02%, 具有 1、2 和 3 个月时滞的区域分别占

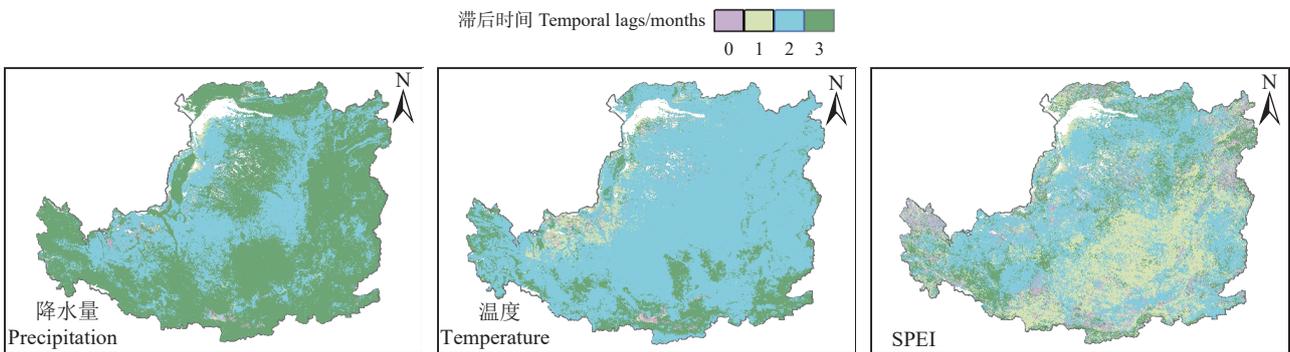


图 2 黄土高原 NDVI 与降水量、温度及 SPEI 之间的时滞分析空间分布格局

Figure 2 Analysis of the spatial distribution pattern of time lag between the NDVI and precipitation, temperature, and SPEI on the Loess Plateau

NDVI: 归一化植被指数; SPEI: 标准化降水蒸散指数。下图同。

NDVI: normalized difference vegetation index; SPEI: standardized precipitation evapotranspiration index. This is applicable for the following figures as well.

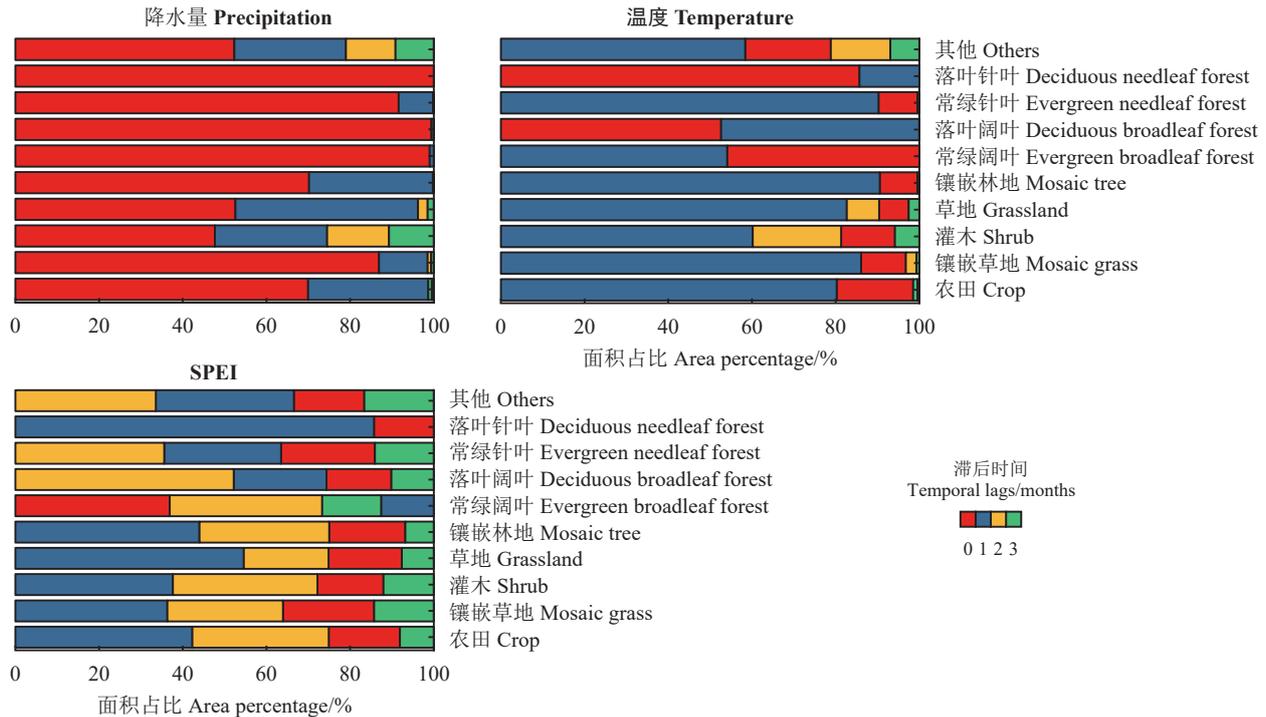


图3 黄土高原不同植被类型NDVI与降水量、温度及SPEI之间的时滞分析

Figure 3 Analysis of the time lag between NDVI and precipitation, temperature, and SPEI for different vegetation types on the Loess Plateau

总面积的42.31%、32.59%和8.08%，平均时滞为1.32个月(0.85 SD)。灌木对SPEI的滞后效应也表现出差异，其中无时间滞后的区域占总面积的15.77%，1个月滞后效应的区域占总面积的37.66%，2个月滞后效应的区域占总面积的34.53%，3个月滞后效应的区域占总面积的12.02%，其平均时间滞后为1.43个月(0.90 SD)。草地对SPEI的滞后效应也呈现出多样性，其中无时间滞后的区域占总面积的17.50%，1个月滞后效应的区域占总面积的54.58%，2个月滞后效应的区域占总面积的20.26%，3个月滞后效应的区域占总面积的7.63%，其平均时间滞后为1.18个月(0.81 SD)。

2.2 基于多元线性回归模型的预测

多元线性回归模型的决定系数(R^2)表示气候因素对植被生长影响的解释程度， $R^2 > 0.316$ 代表 $P < 0.05$ 。在此基础上，本研究进一步比较了考虑滞后效应与不考虑滞后效应的回归模型的 R^2 值(图4)。

在考虑滞后效应的情况下(图4A)，通过多元线性回归分析建立气候因素与黄土高原植被之间的关联，结果显示在研究区域内，气候对植被生长的平均解释能力为58.20%。图4B则展示了在没有时

间滞后效应的情况下得出的决定系数。如果不考虑植被的滞后影响，平均解释率下降至48.20%。这表明，如果在区域尺度上的多元线性回归分析模型中纳入时间滞后效应，气候对植被生长的解释将增加10.00%。绝大多数植被类型的解释效力介于66.00%~76.00%，表明该模型在大多数情况下准确性较高。然而对于灌木的模型结果表明，植被生长的解释程度较低，仅为31.00%。对于农田、镶嵌草地、草地、镶嵌林地、常绿阔叶林、落叶阔叶林和常绿针叶林等植被类型，与未考虑时滞效应的模型相比，改良模型的解释能力分别提高了9.91%、8.07%、12.01%、10.40%、2.67%、2.03%和9.57%。因此，考虑植被对气候因素的时间滞后效应，有助于更深入地理解植被对气候的响应。

2.3 黄土高原植被的气候驱动因素的空间格局

采用偏相关分析法探讨黄土高原植被对气温、降水量和SPEI 3个因子的响应空间分布，结果发现其中每个因子对NDVI的独立影响程度各不相同(图5)。在考虑滞后效应的前提下，温度是影响研究区植被动态变化的主导气候因子，平均偏相关系数为0.553；第2个主导因素为降水量，平均偏相关系

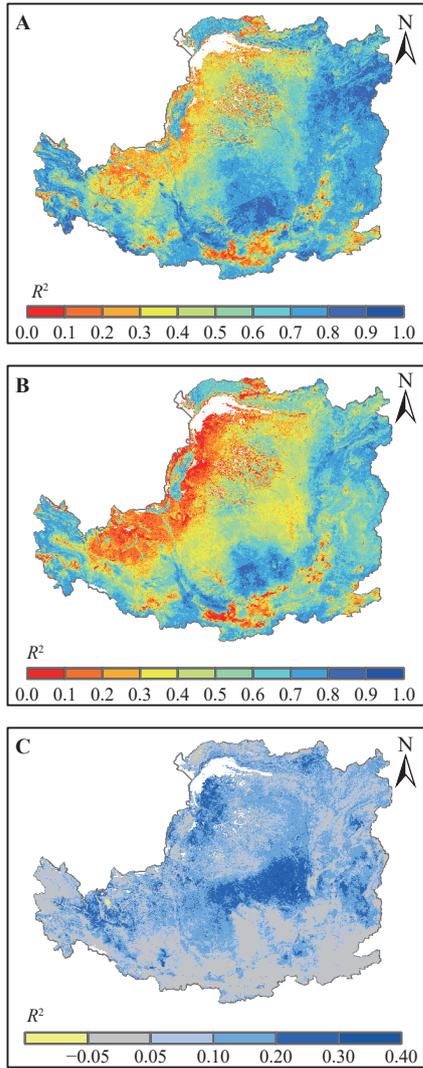


图 4 黄土高原植被与气候因素多元线性回归模型的决定系数 (R^2) 空间分布

Figure 4 Spatial distribution of the coefficient of determination for the multiple linear regression model between vegetation and climate factors on the Loess Plateau

A: 考虑时间滞后效应; B: 不考虑时间滞后效应; C: 考虑时间滞后效应与不考虑时间滞后效应的 R^2 的变化, 反映了植被对气候条件的响应变化。

A: Considering the time lag effect; B: Ignoring the time lag effect; C: Variation in the coefficient of determination (R^2), with and without accounting for the time lag effect, reflects changes in the response of vegetation to climatic conditions.

数为 0.208; SPEI 对黄土高原植被动态变化影响最弱, 偏相关系数仅为 0.112。除西北部分地区及南部小部分地区除外, 黄土高原大部分地区植被生长与温度呈显著正相关关系。降水量对黄土高原植被动态影响的区域主要分布在中部、西部和北部部分地区。SPEI 对黄土高原植被的影响在空间上没有明显规律性, 在研究区西北部分地区有显著性影响。

进一步研究表明, 农田与温度之间的偏相关系数为 0.60 (0.19 SD), 而与降水量之间的偏相关系数为 0.22 (0.13 SD), 表明温度对农田的影响大于降水量。黄土高原上的大多数农田作物主要依靠灌溉持生长, 因此对基于潜在蒸散发与降水计算的 SPEI 来说, 二者之间并没有显著相关性。草地和镶嵌草地生长受温度和降水量共同驱动, 且温度的正效应大于降水量, 其偏相关系数分别为 0.46 (0.25 SD) 和 0.22 (0.13 SD)、0.64 (0.20 SD) 和 0.21 (0.12 SD)。这些以草本植物为主的植被区域气候特点表现为低温、低湿和较长的日照时长, 因此温度和降水量对其生长的影响较为显著。镶嵌林地和灌木受到温度、降水量和 SPEI 的共同影响, 其中温度和 SPEI 的驱动效应最为显著, 偏相关系数分别为 0.64 (0.15 SD) 和 0.22 (0.11 SD)、0.23 (0.28 SD) 和 0.20 (0.16 SD)。由于灌木和镶嵌林地等森林植被根系较深, 具备较强的地下水吸取能力, 因此相较于其他气候因素对降水量的依赖较弱, 偏相关系数分别为 0.16 (0.14 SD) 和 0.22 (0.11 SD)。落叶阔叶、常绿阔叶、落叶针叶以及常绿针叶的生长主要由温度所驱动, 偏相关系数分别为 0.76 (0.06 SD)、0.71 (0.07 SD)、0.75 (0.05 SD) 和 0.71 (0.07 SD)。落叶阔叶、常绿阔叶和常绿针叶主要分布在陕西省南部、山西省以及河南省境内, 水热条件较好, 相对其他区域降水充足、相对湿润, 因此温度是植被生长主要限制因素。

2.4 2000—2018 年黄土高原气候变化驱动的植被动态空间格局

建立线性回归模型分析 2000—2018 年研究区植被覆被显著变化的区域 (图 6A), 以及温度、降水量和 SPEI 显著变化的空间模式 (图 6B)。结果发现, NDVI 变化趋势显著的地方大多数对应一个或者多个气候因子的变化, 如在黄土高原西南部分地区的温度呈显著升高趋势, 北部和中部地区降水显著增加, 此结果支持了气候变化是植被变化的关键驱动因子的观点^[23-24]。温度变化显著且 NDVI 显著变化的区域占 NDVI 显著变化区域的 23.50%, 降水变化显著区域占 19.58%, SPEI 变化显著区域仅占 0.14%。表明黄土高原温度的变化是植被变化的主要影响因子, 这与 Su 等^[25]的观点一致, 即气候变暖导致了北半球高纬度植被增加。黄土高原东部及东南部分地区植被的降低趋势可以归因于资源过度

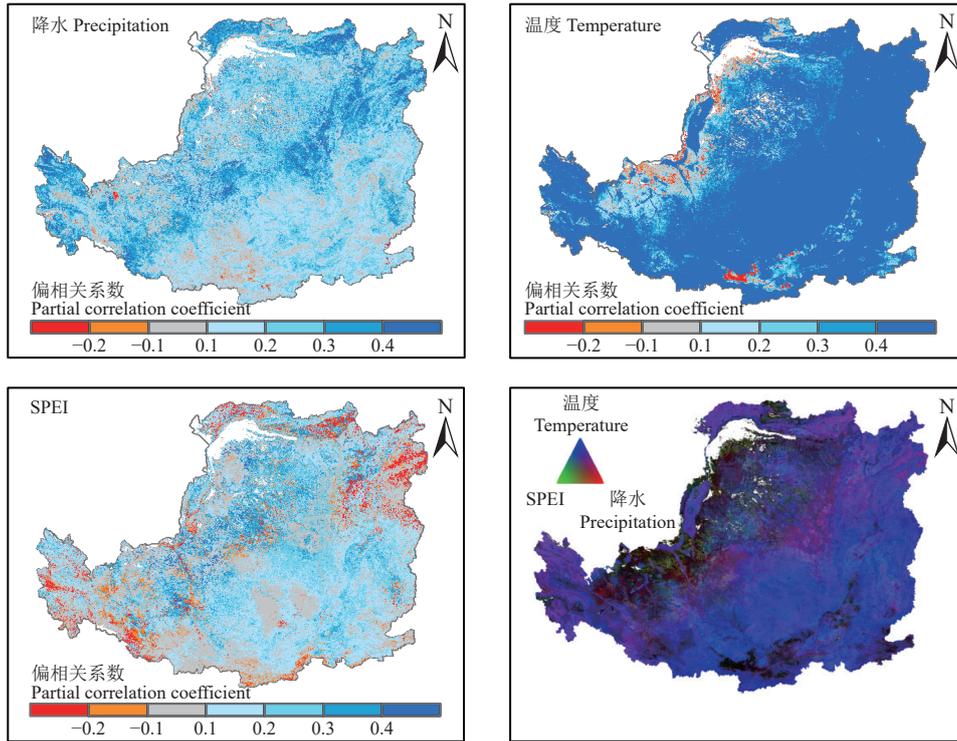


图 5 2000—2018 年黄土高原 NDVI 与降水量、温度和 SPEI 的偏相关性及其不同偏相关系数的 RGB 合成图

Figure 5 Partial correlation between NDVI and precipitation, temperature, and SPEI on the Loess Plateau from 2000 to 2018, and an RGB composite map of the different partial correlation coefficients

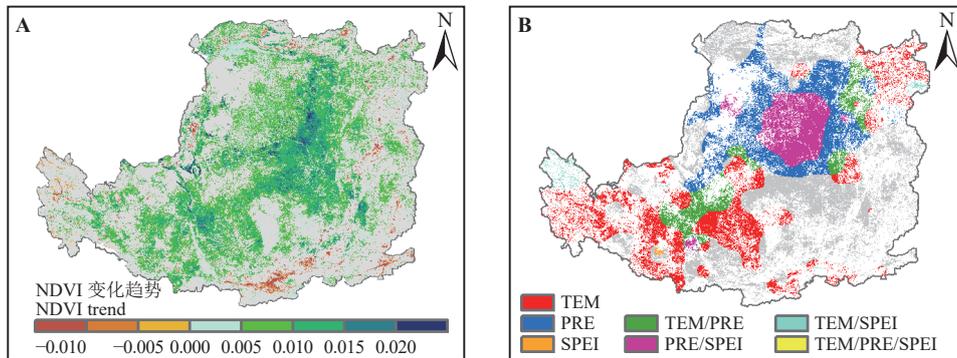


图 6 2000—2018 年黄土高原 NDVI 变化趋势 (A) 及气候因子显著变化的空间分布格局 (B)

Figure 6 Spatial distribution pattern of NDVI trends (A) and significant climate factor changes (B) on the Loess Plateau from 2000 to 2018

TEM: 温度; PRE: 降水量。

TEM: temperature; PRE: precipitation.

开发利用、城市化推进及与立地条件不适的恢复措施^[26]。有些地区气候因子没有显著变化而 NDVI 变化显著,如陕西东南部分地区植被呈显著增长趋势而气候因子没有显著变化,该地区植被增加与当地长期持续有效的退耕还林还草工程密切相关^[27]。

3 讨论

根据 IPCC 的报告,过去 30 年是北半球的最热

时段,北半球的大部分地区都在经历持续变暖的趋势,这一全球变暖现象进一步改变了海陆之间的热力差异,从而导致区域或全球的降水格局发生了变化^[28-29]。气温和降水量是气候变化的主要表征因素,它们的时空变化对全球陆地生态系统的生长、分布模式及功能特征产生了深远影响。作为典型的半干旱大陆季风气候区,黄土高原植被与气候之间存在紧密的相互作用关系,气候变化可以直接或间

接地影响植被的健康、分布和生态系统的稳定性,单一气候因素的驱动效应不足以解释黄土高原的植被变化,这是多个气候因素复杂耦合响应的结果^[30]。因此,在这项工作中,SPEI 被认定为气候因素,它综合考虑了温度和降水量的耦合效应,以研究黄土高原不同植被类型对干旱的响应机制。

本研究旨在探究黄土高原植被对气候变化的时间滞后效应,利用时间序列分析方法结合多元线性回归和偏相关模型,揭示了植被对气候因素反应的复杂性和区域特异性。特别是在考虑时间滞后效应时,气候因素对植被生长变化解释程度的显著提高(从 48.20% 提升至 58.20%),验证了该方法能够精确地捕捉和解释植被对气候变化的响应机制。本研究表明,不同植被类型对气候变化的响应存在显著差异,对不同植被类型在时间滞后效应上的差异分析得出,即使是相同的气候变化,不同植被类型也呈现出不同的反应模式和适应策略。这可能与不同植被类型的生态功能和生物地理特性有关,如灌木和草本植物由于其生长周期和水分需求的差异,在气候变化下的适应和响应模式不同^[31]。森林植被相较于其他植被对降水量未表现出显著的时间滞后效应,可能是 NDVI 在高植被覆盖区域容易出现饱和和现象导致的^[32],对于黄土高原的森林区域而言,NDVI 的确可能在一定程度上不能完全反映植被的真实状态,特别是在植被覆盖度较高时。这种饱和现象可能导致本研究观察到的降水量对植被影响的时间滞后效应不是很明显。未来应采用更高分辨率的植被指数数据,或者结合其他类型的遥感数据,以更准确地评估不同植被类型对气候变化的响应,特别是在高植被覆盖度区域。

在本研究中,采用了保留两位小数来精确表达平均滞后时间。尽管这种精细度在月尺度数据分析中似乎过高,但它有助于揭示不同植被类型或区域间的微妙差异,并为未来可能使用更高时间分辨率

(如日尺度)的研究提供了一种参考。本研究侧重于区域尺度上气候因素的影响,未涵盖非气候因素(如自然或人为干扰)对植被的影响,因此没有定量分析这些非气候因素,这些因素在未来研究中需进一步考虑。为了更好地解释植被与气候因素之间的滞后效应,未来的研究将采用日尺度或更高分辨率的数据,以探索植被对气候变化的即时反应。这不仅可以提高研究的精确性,还可以揭示更复杂的植被—气候相互作用模式。综上,本研究为揭示全球气候变化背景下黄土高原植被对气候的空间模式和时间滞后效应提供了理论基础,并且对未来植被生长变化的气候预测具有重要价值。

4 结论

本研究基于黄土高原的气象数据、植被遥感数据和植被覆被分类数据,分析了黄土高原 2000—2018 年生长季期间气候因素对植被的时间滞后效应,揭示了时间滞后对气候因素解释的影响,分析了黄土高原植被变化的主要驱动因素,并探讨了全球气候变化背景下气候因素与植被动态之间的关系,并从驱动因素和植被动态的角度初步阐明了黄土高原植被的时空演变特征。研究结果表明: 1) 相同植被类型对不同气候因素表现出不同的时间滞后效应,而不同植被类型对相同气候因素的响应也存在差异。2) 考虑植被的时间滞后效应对于准确揭示植被生长对气候因素的响应至关重要。总的来说,温度、降水量、SPEI 3 个气候指标在区域范围内解释了植被生长的 58.20%。当考虑时间滞后效应时,解释相对增加了 10.00%。3) 在考虑滞后效应的前提下,温度是影响研究区植被动态变化的主导气候因子。4) 区域尺度上的结果表明,温度是主要驱动因素,温度变化显著且 NDVI 显著变化的区域占 NDVI 显著变化区域的 23.50%。相比之下,降水量和 SPEI 分别占研究区的 19.58% 和 0.14%。

参考文献 References:

- [1] 刘国华,傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 71-78.
LIU G H, FU B J. Effects of global climate change on forest ecosystems. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 71-78.
- [2] SONG S, DING Y, LI W, MENG Y, ZHOU J, GOU R, ZHANG C, YE S, SAINTILAN N, KRAUSS K W, CROOKS S, LYU S, LIN G. Mangrove reforestation provides greater blue carbon benefit than afforestation for mitigating global climate change. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 756-756.

- [3] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, (5): 19-25.
OUYANG Z Y, WANG X K, MIAO H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 19-25.
- [4] 李家誉, 余敦先, 张利平, 夏军, 刘哲琼, 王绿绿, 齐贵增, 邓翠玲. 黄土高原植被变化对气象干旱多尺度响应特征与机制. 水土保持学报, 2022, 36(6): 280-289.
LI J Y, SHE D X, ZHANG L P, XIA J, LIU Z Q, WANG L L, QI G Z, DENG C L. Multi-scale response characteristics and mechanism of vegetation to meteorological drought on the Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 280-289.
- [5] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 常庆瑞. 基于遥感的黄土高原植被物候监测及其对气候变化的响应. 农业工程学报, 2015, 31(15): 153-160.
XIE B N, QIN Z F, WANG Y, CHANG Q R. Monitoring vegetation phenology and their response to climate change on Chinese Loess Plateau based on remote sensing. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(15): 153-160.
- [6] 汲玉河, 周广胜, 李宗善. 气候变化驱动下黄土高原刺槐林气候适宜性和脆弱性. 生态学报, 2023, 43(8): 3348-3358.
JI Y H, ZHOU G S, LI Z S. Climate suitability and vulnerability of *Robinia pseudoacacia* forest driven by climate change on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(8): 3348-3358.
- [7] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2007(11): 1504-1514.
XIN Z B, XU J X, ZHENG W. Impacts of climate change and human activities on changes in vegetation cover on the Loess Plateau. *Science China (Earth Sciences)*, 2007(11): 1504-1514.
- [8] 段艺芳, 任志远, 孙艺杰. 陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应. 生态学报, 2020, 40(10): 3408-3419.
DUAN Y F, REN Z Y, SUN Y J. Time-lag effects of climate on water use efficiency in the Loess Plateau of northern Shaanxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3408-3419.
- [9] 马雄伟, 赵庆志, 姚顽强. 黄土高原植被对气候变化的时滞响应及其时变特征. 西安科技大学学报, 2020, 40(1): 157-166.
MA X W, ZHAO Q Z, YAO W Q. Time lags of vegetation to climate change and temporal characteristics in Loess Plateau. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, 40(1): 157-166.
- [10] 侯西勇, 李明杰, 路晓, 应兰兰, 朱明明. 近十年黄河三角洲 NDVI 时空动态及其对气温和降水的响应特征. 资源科学, 2011, 33(2): 322-327.
HOU X Y, LI M J, LU X, YING L L, ZHU M M. Spatial-temporal dynamics of NDVI and its response to temperature and precipitation in the Yellow River Delta during the period 1998—2008. *Resources Science*, 2011, 33(2): 322-327.
- [11] WANG M A, ZHENG F, WANG S Y. The time lag effect improves prediction of the effects of climate change on vegetation growth in Southwest China. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5580.
- [12] TAJBAKHSH S, EISAKHANI N, KAZEMI A. Assessment of meteorological drought in Iran using standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI). *Journal of the Earth and Space Physics*, 2015, 41(2): 171-181.
- [13] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, XU X L, QIN Y W, NING J, ZHOU W C, ZHANG S W, LI R D, YAN C Z, WU S X, SHI X Z, JIANG N, YU D S, PAN X Z, CHI W F. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14.
- [14] DU Y, ZHAO J, HUANG Q. Quantitative driving analysis of climate on potential evapotranspiration in Loess Plateau incorporating synergistic effects. *Ecological Indicators*, 2022, 141: 109076.
- [15] 岳文泽, 徐建华, 徐丽华. 基于地统计方法的气候要素空间插值研究. 高原气象, 2005(6): 974-980.
YUE W Z, XU J H, XU L H. A study on spatial interpolation methods for climate variables based on geostatistics. *Plateau Meteorology*, 2005(6): 974-980.
- [16] 欧文浩, 苏伟, 张晓东, 管雪萍, 张望. 环境减灾卫星中国陆面多时相遥感数据 NDVI 产品的批处理方法研究. 红外, 2010, 31(9): 37-41.
OU W H, SU W, ZHANG X D, GUAN X P, ZHANG W. Research on batch processing methods for multi-temporal NDVI products of China's land surface. *Infrared*, 2010, 31(9): 37-41.
- [17] 李艳, 张成才, 罗蔚然, 郜文江. 基于改进最大值法合成 NDVI 的夏玉米物候期遥感监测. 农业工程学报, 2019, 35(14): 159-

165.
LI Y, ZHANG C C, LUO W R, GAO W J. Summer maize phenology monitoring based on normalized difference vegetation index reconstructed with improved maximum value composite. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14): 159-165.
- [18] JOHN K, JOHN A D. The quantification of drought: An evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1167-1180.
- [19] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LOPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [20] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 陈汇林, 陈珍莉. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5): 643-649.
LI W G, YI X, HOU M T, CHEN H L, CHEN Z L. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(5): 643-649.
- [21] CHEN T, DE J R A M, LIU Y Y, VAN D W G R, DOLMAN A J. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140(1): 330-338.
- [22] 王海燕, 杨方廷, 刘鲁. 标准化系数与偏相关系数的比较与应用. *数量经济技术经济研究*, 2006(9): 150-155.
WANG H Y, YANG F T, LIU L. Comparison and application of standardized and partial correlation coefficients. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2006(9): 150-155.
- [23] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系: 基于 NOAA 时间序列数据分析. *遥感学报*, 1998(3): 204-210.
SUN H Y, WANG C Y, NIU Z, BUHEAOSIER, LI B. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data. *Journal of Remote Sensing*, 1998(3): 204-210.
- [24] BEI B N, ZI X Z, XIN Y Y, XIN J L, ZHEN W, HUGO A L, SHA P. Regime shift of the hydroclimate-vegetation system in the Yellow River Delta of China from 1982 through 2015. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(2): 024017.
- [25] SU J J, CHANG H H, HYEON J G, MOLLY E B. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008. *Global Change Biology*, 2011, 17(7): 2385-2399.
- [26] 冯伟, 张新和, 李靖, 包忠谟. 研究简报黄土高原地区城市化过程中水土流失对生态环境的影响: 以延安市为例. *水土保持通报*, 2004(6): 26-30, 52.
FENG W, ZHANG X H, LI J, BAO Z M. Soil and water loss during urbanization in Loess Plateau Area and its impact on environment: Setting Yan'an City as an example. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004(6): 26-30, 52.
- [27] GU L, GONG Z W, DU Y X. Evolution characteristics and simulation prediction of forest and grass landscape fragmentation based on the "Grain for Green" projects on the Loess Plateau, P. R. China. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108240.
- [28] 牟翠翠, 张国飞, 效存德, 魏玉国, KRINNER G. PCC 第六次评估报告解读: 多年冻土变化及其影响. *冰川冻土*, 2023, 45(2): 306-317.
MU C C, ZHANG G F, XIAO C D, WEI Y G, KRINNER G. Interpretation of the IPCC Sixth Assessment Report: Permafrost changes and their impacts. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(2): 306-317.
- [29] HU D, TIAN Z P, LI X M, DA B J. Limited skill of projected land precipitation by IPCC models during 2002-2020. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, 128(2): e037851.
- [30] HORVAT C, TZIPERMAN E. The evolution of scaling laws in the sea ice floe size distribution. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(9): 7630-7650.
- [31] 李响, 袁志友, 焦峰. 温度和降水对中国草本植物、灌木和乔木养分重吸收特征的影响. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 87-92.
LI X, YUAN Z Y, JIAO F. Response of nutrient resorption of herbs, shrubs and trees to temperature and precipitation in China. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2): 87-92.
- [32] 杨嘉, 郭铤, 黄蕾诺, 贾建华. 西北地区 MODIS-NDVI 指数饱和问题分析. *高原气象*, 2008, 27(4): 896-903.
YANG J, GUO N, HUANG L N, JIA J H. Analyses on MODIS-NDVI Index saturation in Northwest China. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(4): 896-903.

(责任编辑 魏晓燕)