

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.024

引用格式:胡静瑶,吴友福,王宗森,等.内蒙古阴山地区植被格局时空演变及其与气候因子的关系[J].草地学报,2026,34(6):2217–2228

HU Jing-yao, WU You-fu, WANG Zong-sen, et al. Spatiotemporal Evolution of Vegetation Patterns and Their Relationship with Climatic Factors in the Yin Mountain Region of Inner Mongolia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6): 2217–2228

内蒙古阴山地区植被格局时空演变及其与气候因子的关系

胡静瑶^{1,2}, 吴友福³, 王宗森², 刘宝龙⁴, 张格语², 温仲明², 刘洋洋^{1,2*},
胡尔查^{1,5*}, 赵英涵², 刘辰明⁵

(1. 内蒙古大青山森林生态系统定位观测研究站, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 西藏自治区地质矿产勘查开发局地热地质大队, 西藏 拉萨 850000;
4. 长庆油田分公司第一采油厂, 陕西 延安 716009; 5. 内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:增强型植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)是表征植被活动、理解陆地生态系统碳循环过程的关键指标。探究其对气候变化的响应有助于加深对植被-气候互作机制的理解。本研究以内蒙古阴山地区为研究区, 基于2001–2021年中等分辨率成像光谱仪增强型植被指数(Moderate-resolution imaging spectroradiometer enhanced vegetation index, MODIS EVI)数据集和气象数据, 综合运用趋势分析、偏相关分析、多元线性回归以及偏最小二乘结构方程模型(Partial least squares structural equation modeling, PLS-SEM)等方法, 分析了该地区植被EVI与气候因子的时空变化规律, 并揭示了风速、降水量、温度、太阳辐射对EVI变化的影响机制。结果表明:2001年以来, 研究区植被年均EVI总体呈显著波动上升趋势, 增长斜率为 $0.00274 \cdot a^{-1}$ ($P < 0.01$)。EVI从2001年的0.172上升至2021年的0.256, 增长率达48.8%。空间上, EVI自西北向东南逐渐增大, 大部分区域呈显著增长趋势, 南部增长斜率最高(>0.012)。在影响机制上, 西部和南部EVI的主导因子为风速, 东部为辐射, 北部则受降水、辐射和温度共同影响。本研究对区域生态恢复政策的制定具有重要参考价值。

关键词: EVI; 气候因子; 阴山地区; 时空变化

中图分类号: S812

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2026)06-2217-12

Spatiotemporal Evolution of Vegetation Patterns and Their Relationship with Climatic Factors in the Yin Mountain Region of Inner Mongolia

HU Jing-yao^{1,2}, WU You-fu³, WANG Zong-sen², LIU Bao-long⁴, ZHANG Ge-yu², WEN Zhong-ming²,
LIU Yang-yang^{1,2*}, HU Er-cha^{1,5*}, ZHAO Ying-han², LIU Chen-ming⁵

(1. Inner Mongolia Daqingshan Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 2. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 3. Geothermal and Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lhasa, Xizang 850000, China;
4. Changqing Oilfield Branch First Oil Production Plant, Yan'an, Shaanxi Province 716009, China; 5. Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: The Enhanced Vegetation Index (EVI) is a key indicator for characterizing vegetation activity and understanding the processes of the terrestrial ecosystem carbon cycle. Investigating its response to climate

收稿日期: 2025-06-19; 修回日期: 2025-08-29

基金项目: 内蒙古自治区林业科学研究院开放课题(KF2024MS04); 内蒙古自治区林业科学研究院科研能力提升“揭榜挂帅”项目(2024NLT01); 陕西省林业科技创新重点专项(SXJK2023-02-14)资助

作者简介: 胡静瑶(2002–), 女, 汉族, 浙江温州人, 本科生, 主要从事草地动态遥感监测及其驱动机制研究, E-mail: 1614184590@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: hnlycbtks@163.com; 371338101@qq.com

change helps deepen the understanding of vegetation-climate interaction mechanisms. This study focused on the Yin Mountain region of Inner Mongolia. Utilizing MODIS EVI datasets and meteorological data from 2001 to 2021, and employing methods such as trend analysis, partial correlation analysis, multiple linear regression, and partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM), we analyzed the spatiotemporal patterns of vegetation EVI and climatic factors in the region, and revealed the influence mechanisms of wind speed, precipitation, temperature, and solar radiation on EVI changes. The results indicated that from 2001 onwards, the annual mean EVI in the study area showed a fluctuating yet significantly increasing trend, with a slope of 0.002 74 per year ($P < 0.01$). The EVI increased from 0.172 in 2001 to 0.256 in 2021, representing a growth rate of 48.8%. Spatially, EVI increased gradually from northwest to southeast, with most areas showing a significant increasing trend, and the highest slope (>0.012) was observed in the south. Regarding the influencing mechanisms, EVI in the western and southern parts was primarily driven by wind speed and in the east by radiation, while in the north, it was jointly influenced by precipitation, radiation, and temperature. This research provides valuable insights for formulating regional ecological restoration policies.

Key words: EVI; Climatic factors; Yin Mountain region; Spatiotemporal variation

植被生态系统作为地球生态系统的核心组分,在维系区域乃至全球生态平衡中发挥着不可替代的作用。其不仅承载着生物多样性保育功能,还具备气候调节、水土保持及生态安全保障等关键生态服务价值^[1]。作为地表过程的敏感指示器,植被能够有效反映能量交换、物质循环等自然过程以及区域人类活动的综合影响^[2]。近年来,在全球气温显著升高与极端气候事件频发的背景下^[3],气候变化引发的降水格局、辐射通量及其他气候因子的持续性变异,已对陆地生态系统植被群落的生理生态过程(如物候特征、碳汇功能)及地理分布格局(如植被带迁移)产生了深刻影响^[4]。因此,探究植被格局演变对气候变化的响应机制,对于区域生态系统保护和生态恢复政策的制定具有重要意义。

植被指数(Vegetation indices, VIs)作为表征生态系统状态的关键指标,被学界广泛应用于解析生态环境的时空演变规律。因此,厘清植被指数的动态特征对揭示区域生态环境变化、评估生态政策效能兼具重要理论价值与实践意义;深入探究生态系统植被指数与气候因子的互馈机制,更是优化我国生态环境建设路径的科学基础。基于遥感技术的陆表植被监测的方法具有覆盖范围广、信息获取高效、观测周期短等显著优势。其中,增强型植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)凭借其在大气抗干扰性与饱和效应抑制方面的改进特性,已成为植被长期动态监测的核心参数。该指数在植被覆盖度时空异质性分析、生物量遥感反演、农作物长势监测与产量预估以及水生植物物候特征识别等领域具有广泛的应用价值。从目前来看,国内外学者基于EVI指数探究了不同时空尺度的植被格局演变及其对变化环境的响应机制,多项全国尺度分

析表明,植被活动(以EVI等指标表征)在2000年后总体呈增强趋势,但其与气候因子的关系因植被类型和地域而异。例如,杨铭鑫等^[5]对2001—2020年中国植被EVI数据与气候因子进行研究发现,不同植被类型EVI与气候因子的关系也可能存在差异。刘宸瑄等^[6]探究2001—2021年中国城乡植被覆盖度的时空变化格局发现,中国城乡植被覆盖均呈显著增加趋势。Yang等^[7]对比分析了研究区植被的总体变化趋势、空间分布特征、贵州省不同植被类型在不同坡度条件下的变化趋势,发现EVI、叶面积指数(Leaf area index, LAI)和标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)在不同时间尺度上的正相关性强于负相关性。Chen等^[8]利用LAI, EVI和太阳诱导叶绿素荧光(Solar-induced chlorophyll fluorescence, GOSIF)产品,研究了不同气候类型和植被类型地区植被敏感性的时空变化特征和气候驱动因子。在区域尺度上,研究进一步揭示了主导因子与响应机制的异质性;He等^[9]结合内蒙古自治区气温、相对湿度和降水等数据研究发现,植被生长是多种气候因素和人类活动共同作用的结果,且内蒙古自治区EVI与降雨量的相关性最高,其次是相对湿度和温度。谷正楠等^[10]研究发现, EVI对降水的响应存在明显的空间异质性,具有0~3个月的滞后时间。由此可见, EVI具有空间异质性且受到多种气候因子的直接或间接影响。然而,现有研究多侧重于植被的总体趋势分析,对植被格局内部的空间异质性(如在不同海拔梯度、土地利用类型等的植被响应的差异)缺乏深入探讨。阴山地形复杂,这种‘一刀切’的分析可能掩盖了关键的生态过程。

阴山地区作为我国北方地区核心的江河源头

区、汇水枢纽及生态屏障,其生态安全格局对国家整体环境治理具有战略意义。该地区地处干旱-半干旱气候向湿润-半湿润季风气候的过渡带,气候响应敏感^[11]、生态环境脆弱^[12],是中国北方重要的地理分界线,是季风区与非季风区的分界线、200 mm等降水量线、农牧业过渡地带。阴山地区位于中纬度内陆地区,距离海洋较远,冬夏季分别受蒙古高压和大陆低压控制,气候具有明显的大陆性特征。降水主要集中于夏季,雨热同期,降水方式以暴雨为主,低洼地区、山地、丘陵、河流两岸则可能因此降雨特点受到洪涝灾害的威胁。由于降水量小于蒸发量,干燥成为这一地区气候的一大特点。该区域另一气候特点是多大风^[13]。在此背景下,定量解析阴山地区植被生态系统的动态演变过程及其驱动机制,不仅有助于揭示全球气候变化与植被系统的互馈关系,更可为评估陆地生态系统环境承载力、优化生态过程调控策略提供关键科学依据。

综上所述,本研究基于遥感EVI数据和气象数据(风速、气温、降水和辐射等)等,采用趋势检验、偏相关分析、多元回归分析以及偏最小二乘结构方

程模型(Partial least squares structural equation modeling, PLS-SEM)等统计方法,系统分析2001—2021年内蒙古阴山地区增强型植被指数(EVI)的时空变化特征,并系统探究不同气候因子对植被生长变化的相对贡献度,解析气候变化对植被演变的驱动机理,以期为该地区生态恢复政策的制定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阴山地区位于内蒙古自治区中部(图1),东起锡林郭勒盟多伦县,西至巴彦淖尔市乌拉特前旗,南与山西接壤,根据地理位置不同分为阴山北麓(后山)、阴山南麓(前山),主要包括锡林郭勒盟、乌兰察布市、呼和浩特市、包头市部分地区以及鄂尔多斯市的部分地区。内蒙古阴山丘陵地区耕地面积173.6万 hm^2 ,属干旱、半干旱温带大陆性气候,水资源缺乏,春季多风少雨,夏季冷凉,年平均气温 $1.3\sim 3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期为90~110 d,降水量为250~350 mm^[14]。

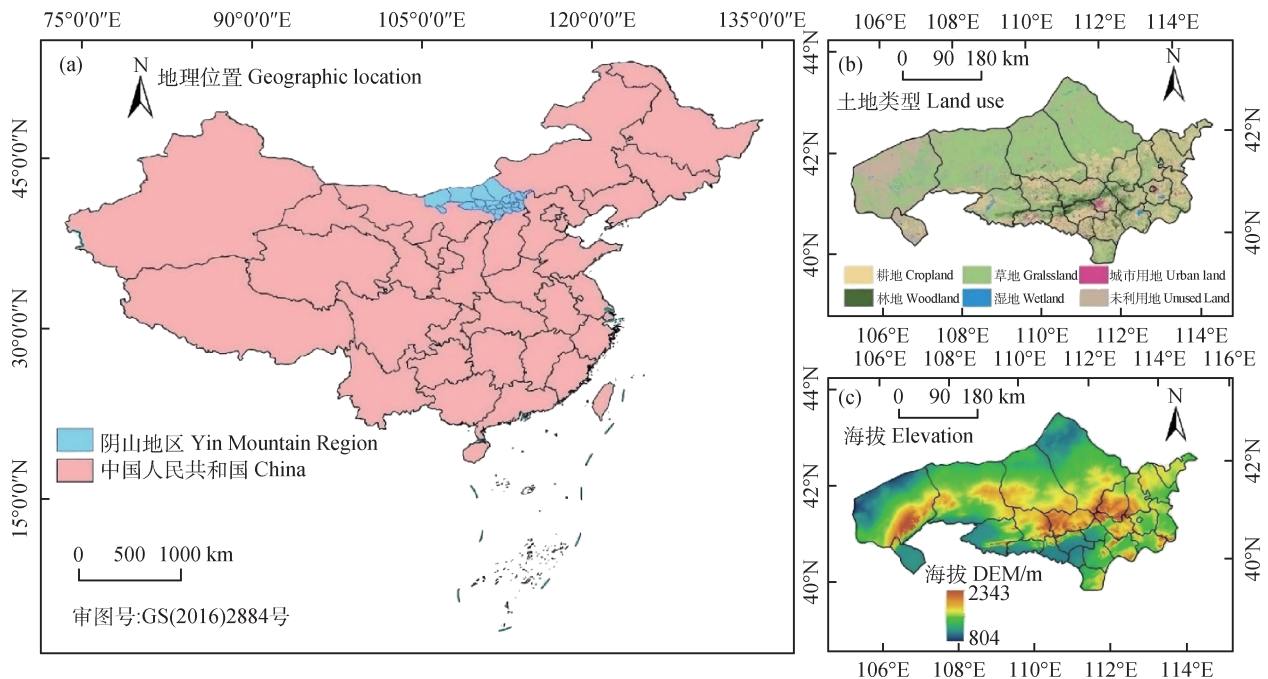


图1 研究区概况

Fig. 1 Geographical overview of the study area

注:a为地理位置;b为土地类型;c为海拔

Note: a is location; b is land cover type; and c is elevation

1.2 数据来源

1.2.1 增强型植被指数 本研究所使用的增强型

植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)数据来源于美国地质调查局(USGS)提供的MODIS产品

(获取地址: <https://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/ims/welcome/>), 时间跨度为2001年至2021年。该数据集的时间分辨率为16天, 空间分辨率为1000 m。MODIS植被指数算法基于像元进行运算, 通过多次观测生成合成产品; 在无云条件下采用时间加权平均法, 而在有云情况下则采用最小值以最大限度消除云的影响^[15]。为进行后续分析, 本研究首先利用ArcGIS 10.8软件, 采用最大值合成法将16天EVI数据合成为月数据。在此基础上, 进一步将月数据合成为年数据, 并利用阴山地区的矢量边界进行掩膜提取, 最终获得用于植被格局变化分析的EVI年均值数据集。

1.2.2 气候变量 本研究采用的气象数据来源于全球土地数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS; <http://ldas.gsfc.nasa.gov>)的GLDAS Noah Land Surface Model L4月产品(GLDAS_NOAH025_M, v2.1)。该数据产品的空间分辨率为0.25°(约25 km), 时间分辨率为月尺度。GLDAS由美国国家航空航天局(NASA)戈达德太空飞行中心(GSFC)等机构联合开发与维护, 利用先进的地表建模和数据同化技术, 融合卫星和地基观测数据产品, 以生成地表状态和通量的最佳场, 用于量化与全球地表水文过程、能量平衡、碳循环等方面相关的关键参数^[16]。GLDAS提供了一系列关键的地表参数, 包括降水量(Precipitation, Pre)、向下短波辐射(Downward shortwave radiation, SRad)、向下长波辐射(Downward longwave radiation, LRad)、风速(Wind speed, WS)和气温(Temperature, Temp)。基于SRad和LRad数据, 本研究采用公式(1)计算了总辐射数据。为了与其他数据的分辨率保持一致, 本研究采用双线性插值法对气象数据进行重采样, 使其分辨率变为1 km。通过将月尺度的气候数据合成为年数据, 并用阴山地区的矢量边界进行掩膜, 以获取研究区的气象数据。

本研究基于原始数据, 根据等式计算总太阳辐射(Rad)公式1:

$$Rad = LRad + SRad \quad (1)$$

式中: Rad是太阳总辐射($W \cdot m^{-2}$), LRad是长波辐射, SRad是短波辐射。

1.3 研究方法

本研究采用Theil-Sen中位数和Mann-Kendall趋势检验等方法分析研究区2001—2021年气候因

子和EVI的时空演变特征; 基于偏相关分析揭示气候变化与植被演变的相关关系; 利用多元回归方法探究不同环境因子变化对EVI变化的相对贡献, 并采用结构方程模型解析不同环境因子变化对EVI时空变化的直接与间接驱动机制。

1.3.1 Theil-Sen趋势分析 Theil-Sen media趋势分析是非参数统计趋势分析方法^[17]。它是通过选择经过成对点的所有线的斜率的中值来将线拟合到平面中的采样点的一种非参数统计中的稳健模型。在分析过程中不要求所分析的数据服从正态分布, 且不受异常值的影响, 因此避免了由少数异常值产生的误差^[18]。计算公式如下:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), 2001 \leq i < j \leq 2021, (i \neq j) \quad (2)$$

式中: β 表示 x 的变化趋势, x_i 代表第 i 年的序列值, x_j 表示第 j 年的序列值。如果 $\beta < 0$, 则 x 在该时间段内呈下降趋势; 如果 $\beta > 0$, 则 x 在该时间段内呈增加趋势; 如果 $\beta = 0$, 则表明在该时间段内 x 基本保持不变。

1.3.2 Mann-Kendall非参数检验 Mann-Kendall非参数检验是一种可以判断气候序列中是否存在气候突变的气候诊断与预测技术, 其优点是它既不需要样本遵循一定的分布, 也不受异常值的干扰, 更适用于类型变量和顺序变量^[17]。计算公式如下:

设定 $\{x_j\}, j = 2001, 2002, \dots, 2021$

$$\text{定义 } Z \text{ 统计量为: } Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{s(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{s(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$s(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中: n 是序列中数据的数量, 统计值 Z 的取值范围为 $(-\infty, +\infty)$, $s(S)$ 为方差。在已经确定的显著水平 α 下, 当满足条件 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时, 则证明研究序列在 α 水平上存在显著变化, 本研究过程取 α 等于0.05和0.01^[19]。

1.3.3 偏相关分析 偏相关分析是在控制其他变

量的线性影响的条件下分析两变量间的线性关系,通常用偏相关系数表示。基于像元的空间分析法,对2001—2021年阴山地区植被EVI数据与气候因子进行偏相关分析,利用偏相关系数来反映EVI与气温、降水量、太阳辐射、风速的相关程度。在多个变量中只分析其中任意两个变量的关系,去除其他变量的影响^[20]。计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中: R_{xy} 为 x, y 两变量的相关系数, x_i 为第 i 年的植被EVI, y_i 为第 i 年的环境因子, $\bar{x}$ 为多年植被EVI的平均值, $\bar{y}$ 为多年环境因子的平均值, n 为样本数。

1.3.4 多元回归分析 本研究构建多元回归模型解析不同环境要素对EVI变化的相对贡献度。为提升不同量纲变量的可比性,本研究对量纲不统一的参数进行标准化预处理。具体通过Z-score方法将各变量转换为均值为0、标准差为1的分布形态。在此标准化模型框架下,各气候因子的相对影响力可通过标准化回归系数 β 值的绝对值进行量化比较。使用标准化的多元线性回归模型,独立变量的相对贡献可以通过以下公式计算:

$$Y = a_0 + \mu + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \quad (8)$$

$$Q_i = \frac{a_i X_{itrend}}{Y_{atrend}} Y_{ntrend} \quad (9)$$

式中: Y 为因变量, x_i 为自变量——温度、太阳辐射和降水量等气候因素, X_{itrend} 是驱动因子的趋势值, a_0 和 a_i 分别为常数误差和标准回归系数; μ 指系统误差。各驱动因子对EVI变化轨迹的影响通过 Q 值进行量化。 Y_{atrend} 表示EVI的实际观测趋势值,而 Y_{ntrend} 表示标准化后的EVI趋势值。为深入揭示主导EVI时空变化的关键驱动因素,本研究在计算各因子相对贡献 Q_i 的基础上,进一步确定了每个像元尺度上的主导因子。首先基于Theil-Sen与Mann-Kendall检验获取EVI的变化趋势方向;对于EVI呈显著上升趋势的像元,主导因子被定义为相对贡献 Q_i 值最大的气候因子,因其提供了最强的正向驱动;对于EVI呈显著下降趋势的像元,主导因子则为 Q_i 值最小的因子,表征其是最主要的限制性因素。

1.3.5 PLS-SEM 偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)不同于传统的统计方法,它可以概念化为联立多方程的估计模型。这种方法允许在方程的任何一侧包含单个变量和多个变量,便于在高度复杂的模型中对介导效应进行全面和适当的分

析^[21]。本研究通过多年平均值,采用Smart PLS 3.2.9进行偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)分析^[22],阐述不同气候因素对EVI的直接或间接影响。结构方程模型表现出极好的拟合优度,多个稳健的统计指标证明了这一点:拟合优度指数(GFI)超过0.9,近似均方根误差(RMSEA)低于0.10,比较拟合指数(CFI)超过0.9,非归一化拟合指数(NFI)超过0.9,非嵌套拟合指数(NNFI)超过0.9, χ^2/df 比值保持低于3^[21]。

2 结果与分析

2.1 EVI的时空变化特征

图2a为EVI空间变化特征,从图中可以看出,阴山地区的东南部植被EVI值高于西北部,西北部有大片地区EVI处于0~0.16之间,主要分布于乌拉特后旗和乌拉特中旗。而中部区域EVI以0.16~0.24为主,主要分布于达尔罕茂明安和四子王旗。东南部区域EVI为0.24~0.64。南部部分地区零散分布着EVI为0.32~0.64的区域。从图2b可以看出,阴山地区EVI的增长趋势呈现明显的空间分异。绝大部分地区的增长趋势相对一致,速率在0~0.006·a⁻¹之间;相比之下,南部少量零散区域的增长趋势更为显著,速率多超过0.012·a⁻¹,东部和西部少量地区EVI呈负增长,主要分布于乌拉特后旗和商都县,其面积约占阴山地区总面积的12%,且显著增加的区域基本涵盖整个阴山地区。由图3可知,阴山地区EVI总体呈显著上升趋势且年际变化较小,其增长速率为0.003·a⁻¹($P < 0.01$),最低值出现在2001年,为0.172,最高值出现在2018年,为0.282。到2021年阴山地区EVI达到了0.256,从2001年至2021年EVI增长率达48.8%。

2.2 气候因子的时空变化特征

如图4a所示,阴山地区平均风速由北向南呈递减趋势,南部大部分地区 $< 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中部在 $2 \sim 2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,北部和极少数西部地区风速 $> 2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。如图4b所示,从变化趋势来看,阴山地区风速年际变化差异不大,北部和东部少数地区风速呈下降趋势,阴山区域南部地区风速趋势则超过0.03,中部和西部地区分布着风速趋势为0~0.03的地区。风速显著增加的区域主要集中在阴山的西部和南部大部分地区。如图4c所示,阴山地区降水量由西北向

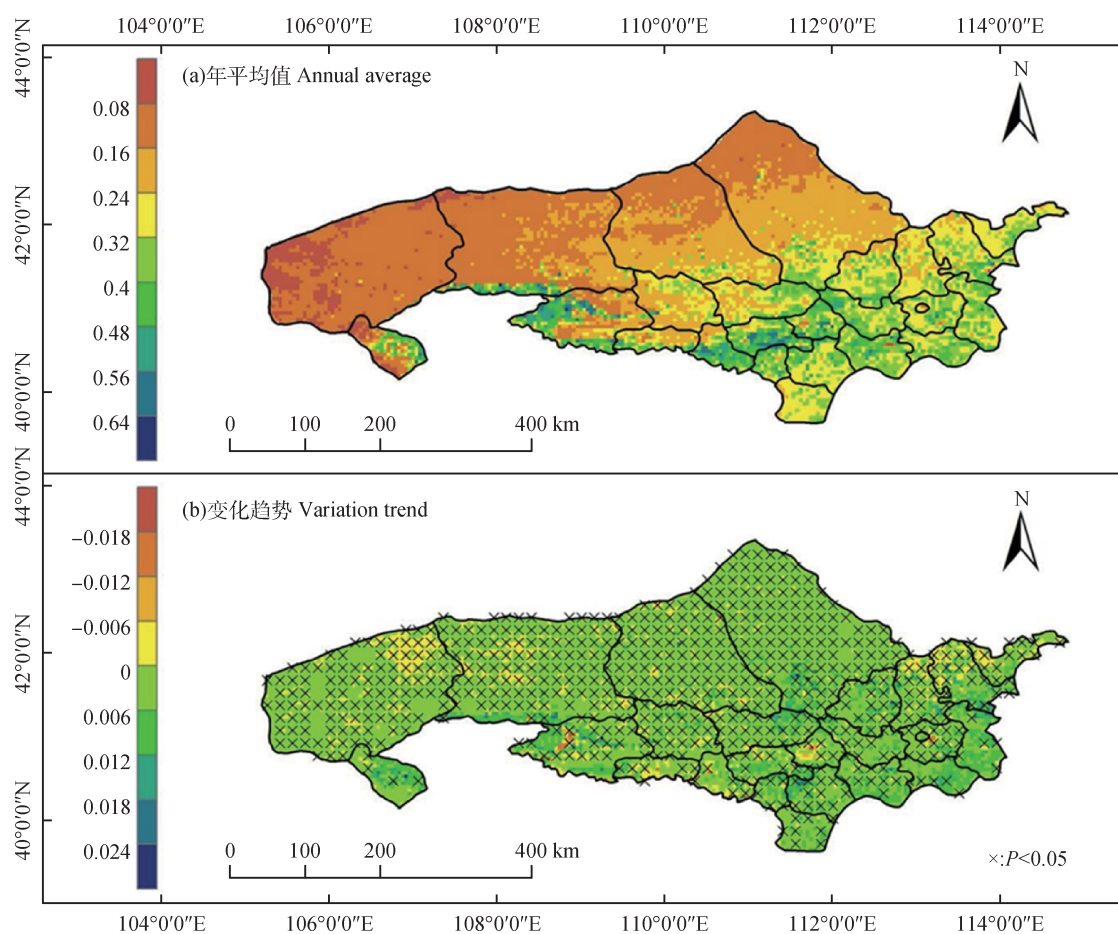


图2 2001—2021年阴山地区EVI的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of EVI in the Yin Mountain region (2001–2021)

注:a为年均值;b为变化趋势。“×”表示 $P<0.05$ 水平的显著性,下同

Note: a is annual mean; b is temporal trend. “×” indicates significance at the $P<0.05$ level, the same as below

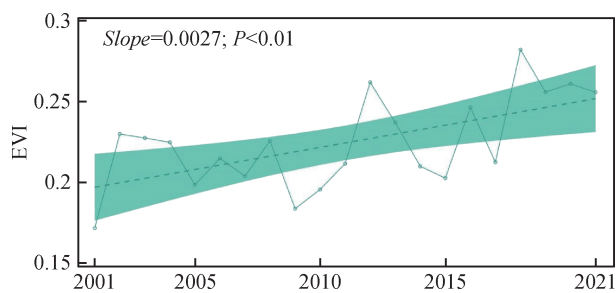


图3 2001—2021年阴山地区EVI的年际变化特征

Fig. 3 Interannual variation characteristics of EVI in the Yin Mountain region from 2001 to 2021

东南呈递增趋势,西北少数地区降水量 $<135\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$,中部为 $135\sim315\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$,东南部地区降水量 $>315\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$,南部边缘零星分布着降水量 $>405\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的地区。如图4d所示,从变化趋势来看,阴山地区降水量年际变化大,在阴山地区的中部和南部大量分布着降水量减少趋势的地区,在北部、东部及西部的零星地区,降水量呈增加趋势,且增速超过 $0.7\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

降水量显著增加的区域基本涵盖了整个阴山地区。如图4e所示,阴山地区太阳辐射由东向西基本呈递增趋势,东部的太阳辐射最高值为 $2378\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,西部的太阳辐射最低值为 $2182\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。如图4f所示,中部和南部太阳辐射增加趋势较明显,其中南部地区的太阳辐射增加趋势尤为明显,增速高于 $1.75\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在东北和东南部存在少部分地区太阳辐射呈减少趋势。太阳辐射显著变化的区域基本涵盖了整个阴山地区。阴山地区温度自东向西基本呈现递增趋势,在西部地区年平均温度可超过 9.6°C ,中部和西部的极少部分地区年均温 $<1.2^{\circ}\text{C}$ (图4g)。如图4h所示,从温度变化趋势来看,年际变化小,极少部分区域分布着温度负增长区域,并且非常分散。阴山地区的温度普遍呈上升趋势,但空间差异明显。绝大部分地区增温幅度微弱,仅有个别局部区域的增温趋势尤为显著。温度显著升高的区域基本涵盖了整个阴山地区。

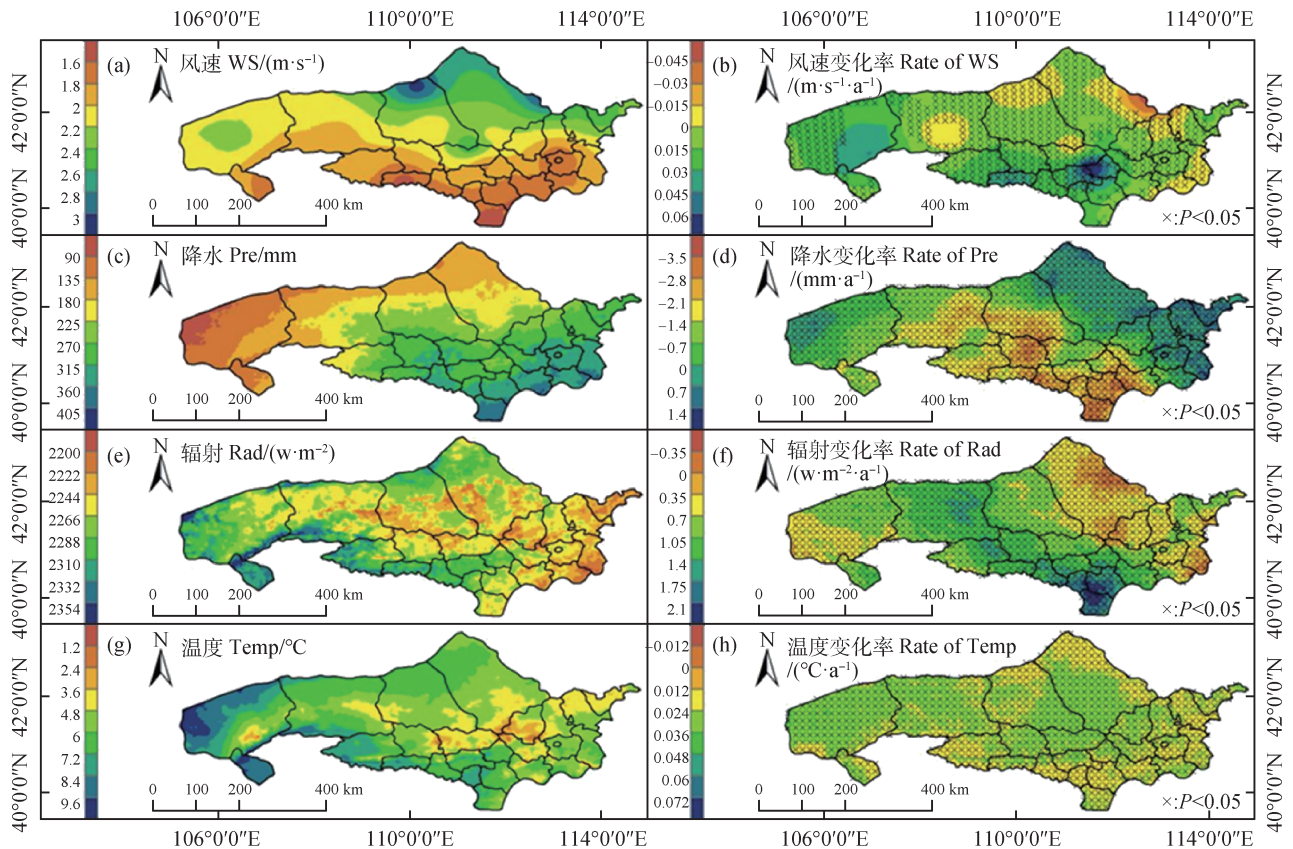


图4 2001—2021年阴山地区不同气候因子的年平均值和变化率的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual mean values and rates of change for different climatic factors in the Yin Mountain region from 2001 to 2021

注:a为风速空间变化特征;b为风速变化率;c为降水空间变化特征;d为降水变化率;e为辐射空间变化特征;f为辐射变化率;g为温度空间变化特征;h为温度变化率

Note: a is spatial variation of wind speed; b is rate of change in wind speed; c is spatial variation of precipitation; d is rate of change in precipitation; e is spatial variation of radiation; f is rate of change in radiation; g is spatial variation of temperature; h is rate of change in temperature

2001—2021年,阴山地区风速、太阳辐射和气温总体上均呈上升趋势,降水量呈下降趋势。风速和太阳辐射上升幅度较大,气温上升幅度较小,各气候因子随年份的变化波动幅度较大(图5)。由图5a可知,阴山地区风速年际变化较小,从2001年至2021年中,风速的增长率为 $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$),最低值在2011年出现,为 $1.90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最高值在2018年出现,为 $2.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图5b可知,阴山地区降水量年际变化较大,从2001年至2021年中,降水量的增长率为 $-0.804 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$),降水量最低值在2005年出现,为 151.56 mm ,最高值在2003年出现,为 319.34 mm 。而图5c表明阴山地区的太阳辐射随年际变化较小,在2001年至2021年中,太阳辐射的增长率为 $1.694 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$),太阳辐射最低值在2003年出现,为 $2186.68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,最高值在2009年出现,为 $2326.84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。图5d表明阴山地区温度随时间的年际变

化不大,在2001年至2021年中,温度的增长率为 $0.024 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$),最低值在2012年出现,为 4.78°C ,最高值在2007年出现,为 6.86°C 。

2.3 EVI对气候变化的响应

图6a表明阴山地区EVI与风速的偏相关系数在 $-0.88 \sim 0.85$ 之间。西部与南部地区EVI与风速以正相关关系为主,北部与东部区域呈负相关关系且影响均显著。图6b表明阴山地区EVI与降水量的偏相关系数在 $-0.82 \sim 0.85$ 之间。偏相关分析表明,降水量与EVI的相关性存在明显的空间分异性,在北部地区呈最强的正相关,而在南部和西南部地区则主要表现为负相关。植被EVI与降水量呈显著正相关 ($P < 0.05$) 的区域主要分布在阴山地区的北部、东部和西部。图6c表明太阳辐射与EVI正相关系数最高为 0.82 ,负相关系数可达 -0.81 。太阳辐射与EVI的偏相关系数在西部和

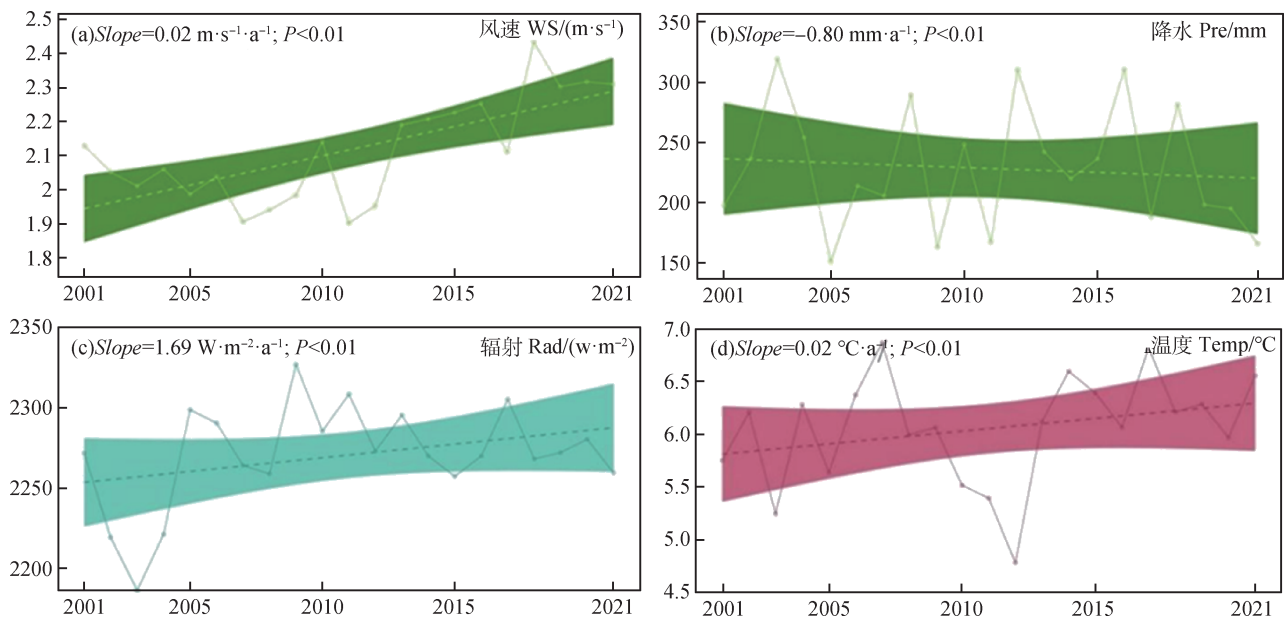


图5 2001–2021年阴山地区不同气候因子的年际变化特征

Fig. 5 Interannual variation characteristics of different climatic factors in the Yin Mountain region from 2001 to 2021

南部地区主要为负值,植被EVI与太阳辐射呈显著正相关($P < 0.05$)的区域主要分布在阴山地区的西南和东南部分区域,植被EVI与太阳辐射呈显著负相关的区域主要分布在阴山地区的西部和南部区域。EVI与气温偏相关系数在 $-0.77 \sim 0.78$ 之间(图6d)。温度与EVI的相关性存在显著的空间差异。正相关区广泛存在于研究区北部、东部及西部的大部分区域;与之相反,负相关区仅为零星分布,且高度集中于西部。

图7为基于多元回归分析的阴山地区各气候因子对EVI变化的相对贡献率。从图中可以看出,风速对EVI的贡献区域基本为负,正贡献区域零散分布在阴山地区的南部区域。降水量对EVI的负贡献区域主要分布在阴山地区的南部和中部地区。降水量的负贡献区域中,贡献率 < -0.03 的区域零星分布在阴山地区的中部和中南部。正贡献区域分布在阴山地区的北部和东部部分区域,其中贡献 > 0.04 的集中分布在阴山地区的东部区域。太阳辐射对EVI的负贡献区域主要分布在阴山地区的中部、北部和西部地区,其中贡献率 < -0.1 的区域零星分布在阴山地区的中南部地区,正贡献区域分布在阴山地区的东北部区域,其中贡献 > 0.1 的主要分布在阴山地区的西南部区域。温度对EVI的负贡献区域主要分布在阴山地区的东北部和南部地区,正贡献区域分布在阴山地区的中部、东南部和西南部区域,其中贡献 > 0.09 的零散分布在阴山

地区的东南部和中部区域。如图8所示,阴山地区植被EVI受多种气候因素的影响,按相对贡献率分级可知,北部EVI受降水影响大,主要在四子王旗北部;其余地区EVI受降水影响小。阴山地区东部EVI受辐射影响大,主要在商都县、兴和县和丰镇县;其余地区EVI受辐射影响小。在阴山地区的西部和南部,风速是影响EVI的主导因子,这些区域主要位于四子王旗南部以南及乌拉特中旗西部以西;而东部地区EVI的主要影响因子为太阳辐射;该区域的北部,EVI则受降水、辐射和温度的综合影响,核心区分布于达尔罕茂明安联合旗及其周边地带。

如表1所示,通过通径分析,阐明了阴山地区不同气候因子对EVI的直接和间接影响。如图9所示,利用所选变量风速(WS)、太阳辐射(Rad)、温度(Temp)和降水量(Pre)构建的偏最小二乘结构方程模型解释了EVI的43.8%的变异度($R^2 = 0.438$)。WS是反映EVI变化的最具指示性的生态参数,其累积影响为0.55。此外,Pre还通过WS($\text{Pre} \rightarrow \text{WS} \rightarrow \text{EVI}$)(0.228)和Temp($\text{Pre} \rightarrow \text{Temp} \rightarrow \text{EVI}$)(-0.461)间接影响EVI的变化。Temp还通过WS($\text{Temp} \rightarrow \text{WS} \rightarrow \text{EVI}$)(0.403)间接影响EVI的变化。Rad通过WS($\text{Rad} \rightarrow \text{WS} \rightarrow \text{EVI}$)(0.075)和Temp($\text{Rad} \rightarrow \text{Temp} \rightarrow \text{EVI}$)(-0.204)间接影响EVI的变化。Temp和Rad对EVI有负的直接影响,影响系数分别为 -0.111 和 -0.032 。

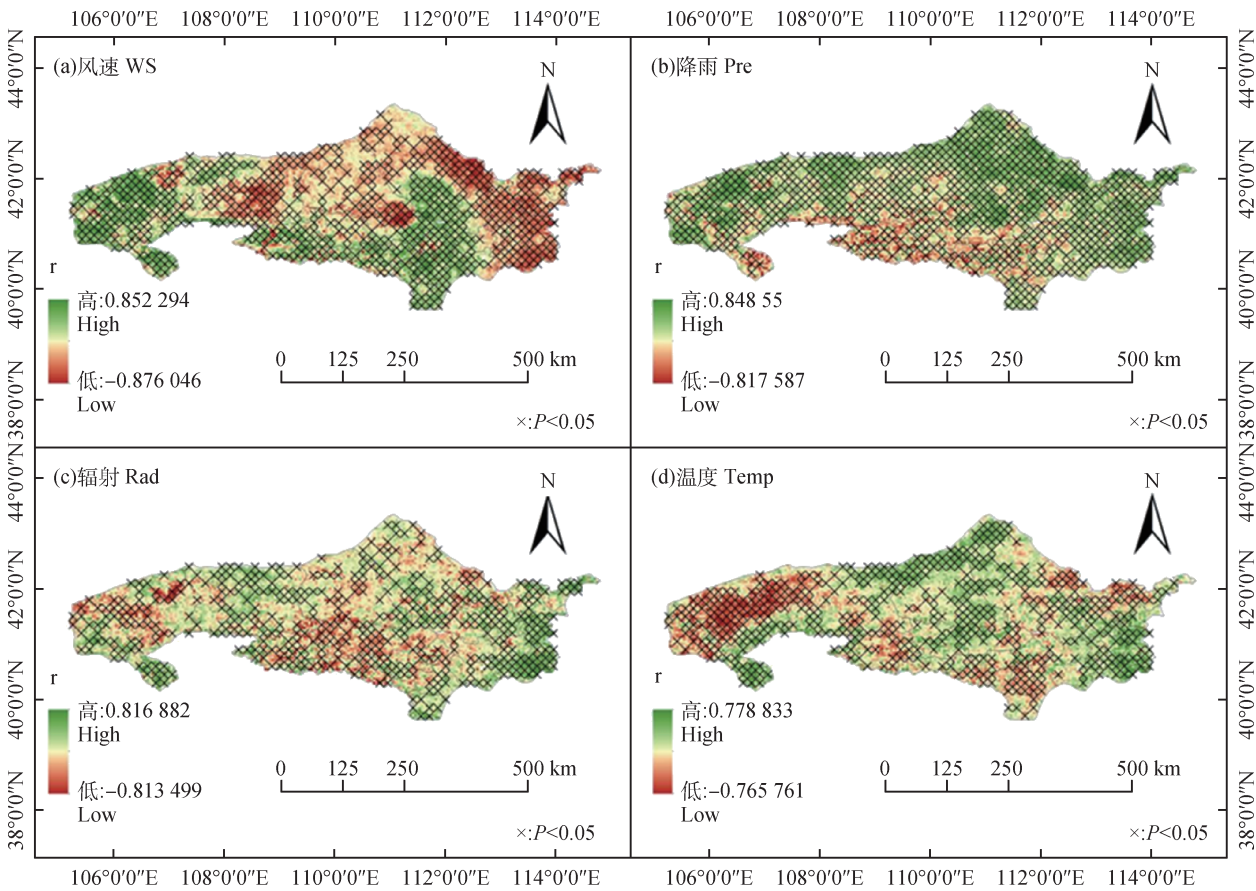


图 6 阴山地区 EVI 与不同气候因子的偏相关系数

Fig. 6 Partial correlation coefficients between EVI and different climatic factors in the Yin Mountain region

表 1 各因素的通径系数

Table 1 Path coefficients of factors

输出项 Output	气候因子 Climatic factors	直接路径系数 Direct path coefficient	间接路径系数 Indirect path coefficient				间接路径总和 Indirect path sum	总路径系数 Total path coefficient
			风速 WS	降水 Pre	温度 Temp	辐射 Rad		
增强型植被指数 EVI	风速 WS	0.550	—	—	—	—	—	0.550
	降水 Pre	0.327	0.228	—	−0.461	—	−0.233	0.094
	温度 Temp	−0.111	0.403	—	—	—	0.403	0.292
	辐射 Rad	−0.032	0.075	—	−0.204	—	−0.129	−0.161

3 讨论

本研究发现,2001年以来阴山地区整体年均EVI呈现波动上升趋势,其增长速率为0.002 74($P<0.01$),此研究发现与前人的2001—2020年中国植被生长整体上呈上升趋势的研究结论一致^[5]。东南地区气候条件优于西北地区,适宜的气候条件为植被生长提供了有利的条件。良好的植被生长状况又会反作用于环境,进而改善优化环境^[23]。刘宸瑄等^[6]发现中国城乡植被覆盖均呈显著增加趋势,可能是因为退耕还林还草工程的实施使得中国大部分地区植被覆盖率显著上升,生态环境得到明显改

善^[24]。与此同时,本研究区观测到的气候条件也为植被恢复提供了可能,例如研究期内温度呈波动上升趋势,年平均气温增至近6.5℃,为植被恢复提供基础水热条件。阴山地区大部分区域EVI变化与气温、降水量、太阳辐射和风速等气候因子均呈现出正相关关系,但地域间存在差异。阴山地区的东南部植被覆盖度和生长状态优于西北部,增长趋势同样为东南部大于西北部。这可能是受到降水因素影响,阴山地区的降水由西北向东南呈递增趋势,与EVI对降水的响应存在明显的空间异质性的研究发现^[10]一致。且内蒙古自治区EVI与降雨量的相关性最高,其次是相对湿度和温度。这一空间

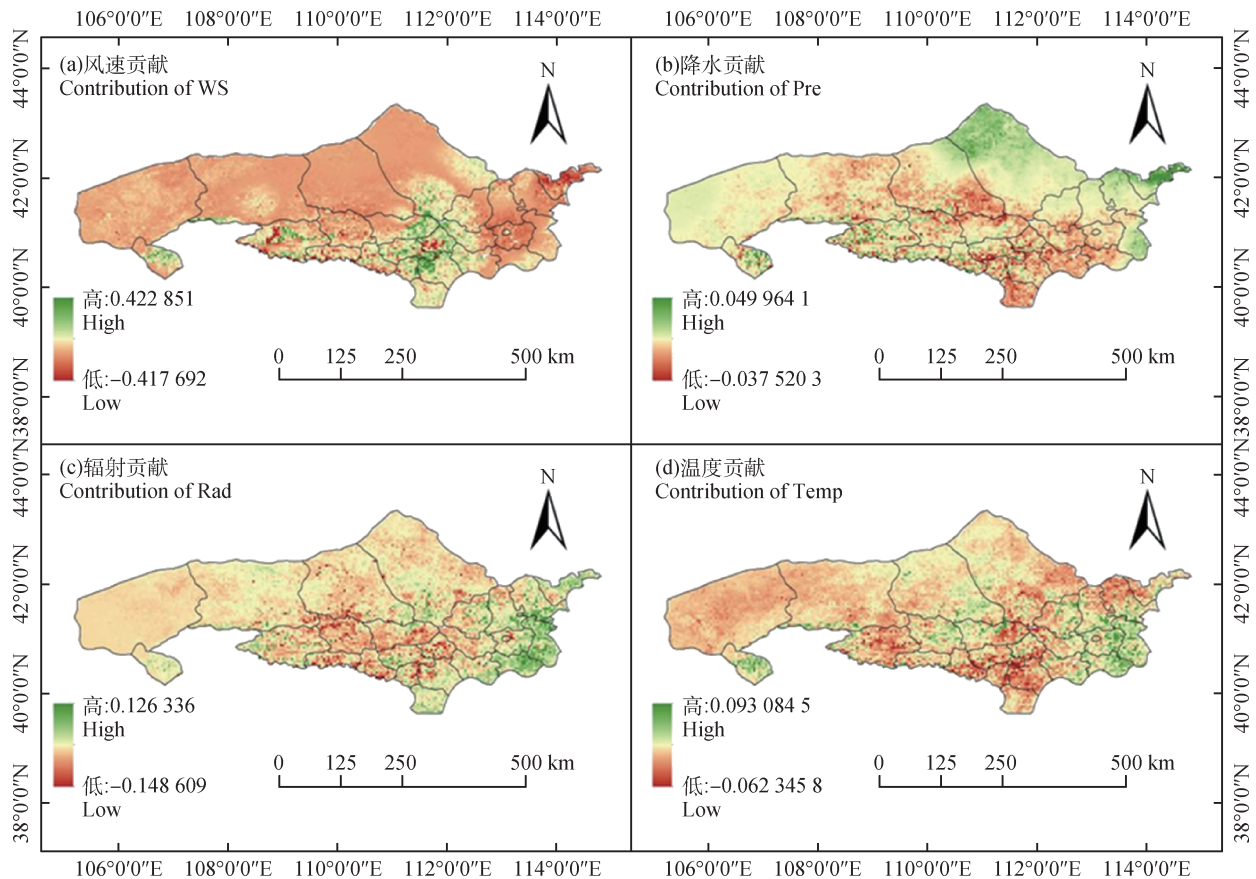


图7 不同气候因子对EVI变化的相对贡献

Fig. 7 Relative contributions of different climatic factors to EVI changes

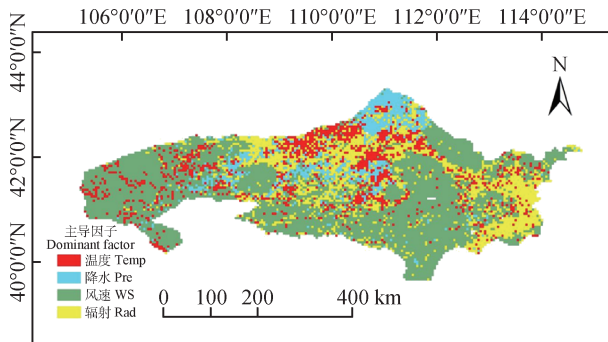


图8 不同气候因子对EVI变化的主导格局分布

Fig. 8 Spatial distribution of dominant climatic factors driving EVI changes

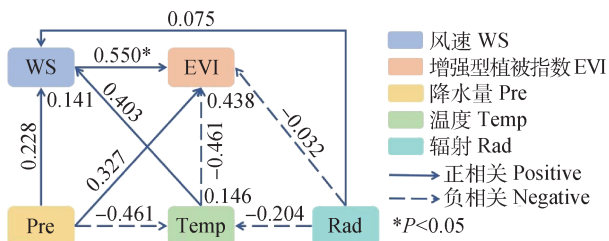


图9 不同环境因子对EVI变化的直接与间接效应

Fig. 9 Direct and indirect effects of different environmental factors on EVI changes

分异格局与He等^[9]在内蒙古自治区发现的EVI与降雨量相关性最高的结论相符。此外,阴山地区“西高东低、南陡北缓”的复杂地形,通过重新分配水热资源(如迎风坡与背风坡的降水差异),进一步强化了植被对降水响应的空间异质性^[13]。值得注意的是,东部和南部区域分布EVI降水负相关区域($P<0.05$)可能是因为在降水较少时,该地区植被通过调整生长策略以维持正常生长,使得的EVI相对较高^[25],需结合微地形与土壤理化性质进一步验证。此外,阴山地区北部植被EVI与降水量呈负相关。2003年中国北方地区降水量较常年明显偏多,为1961年以来第二个多雨年^[26],这种不均衡的降水分布可能对当年的植被生长产生了影响,从而导致EVI下降。总体上,阴山地区降水量年际变化大,中部和南部降水量减少,而北部、东部和少量西部地区降水量增加,长期积累可能改变区域水热平衡^[27]。

PLS-SEM能够将整个气候-植被系统视为一个具有内在结构的整体。它不再将因子孤立看待,而是通过预先设定的理论路径假设来同时检验多个变量之间的复杂关系网络。在阴山地区东部和中部部

分地区EVI受辐射影响大,同时辐射因子在阴山地区空间变化上为中东部高周边低。偏相关分析结果表明,太阳辐射与EVI的相关性在北部和西部地区较强。高辐射区通常对应低云量环境,光能利用率提升直接促进 C_3/C_4 植物光合作用^[28]。在东南部少量区域,EVI与太阳辐射呈负相关。PLS-SEM路径分析为此提供了机理解释。辐射增强会直接导致温度升高,而在本研究区半干旱的气候背景下^[29],升温会加剧土壤水分蒸发,从而引发水分胁迫。因此,在这些区域,太阳辐射的正面效应被其加剧水分消耗的负面效应所掩盖,最终表现为对植被生长的抑制。这凸显了在水分限制区域,能量因子(辐射)需要通过改变水分状况这一关键中介,才对植被产生复杂影响。当土壤水分不足时,太阳辐射增强会导致EVI下降^[30]。偏相关分析进一步揭示,温度与EVI的负相关关系在阴山地区的东部、西部和南部尤为显著,表明在这些区域,气温升高可能通过加剧土壤水分蒸发等方式,对植被生长产生了一定的抑制作用。温度变化会影响生长季的长度,即影响植被能够进行光合作用和生长的时间^[31],进而影响EVI。

He等^[9]研究发现,植被生长是多种气候因素和人类活动共同作用的结果,尽管本研究系统探究了阴山地区植被格局演变对气候变化的响应机制,但是缺乏人类活动对植被变化影响的分析。因此,未来研究还需综合考虑人类活动、生态保护政策等因素对植被格局变化的影响。

4 结论

本研究系统分析了2001—2021年内蒙古阴山地区植被EVI的时空演变及其对气候变化的响应,主要结论如下:

(1)时序上,研究区植被活动显著增强,年均EVI以 $0.00274 \cdot a^{-1}$ ($P < 0.01$) 的速率波动上升,从2001年的0.172增长至2021年的0.256,增幅达48.8%。

(2)空间上,EVI呈现“西北低、东南高”的分布格局。大部分区域植被呈显著改善趋势,其中南部地区增长最快,斜率普遍超过0.012。

(3)气候驱动机制具有明显的空间分异:风速是西部和南部EVI变化的主导因子,太阳辐射主导东部地区,而北部地区则受降水、辐射和温度三者协同影响。

参考文献

[1] 谭淑豪,叶卓卉,叶子龙,等. 北方农牧交错带牧户饲草地建

设对草原植被覆盖的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(22): 10044-10054

TAN S H, YE Z H, YE Z L, et al. Impacts of forage land construction on grassland vegetation coverage at herders' scale in the farming-pastoral ecotone of northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10044-10054

[2] QU L L, HUANG Y X, YANG L F, et al. Vegetation restoration in response to climatic and anthropogenic changes in the Loess Plateau, China[J]. Chinese Geographical Science, 2020, 30(1): 89-100

[3] SARKAR S K, ANSAR S B, EKRAM K M M, et al. Developing robust flood susceptibility model with small numbers of parameters in highly fertile regions of northwest Bangladesh for sustainable flood and agriculture management[J]. Sustainability, 2022, 14(7): 3982

[4] 李峰,周广胜,曹铭昌. 兴安落叶松地理分布对气候变化响应的模拟[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2255-2260

LI F, ZHOU G S, CAO M C. Responses of *Larix gmelinii* geographical distribution to future climate change: A simulation study[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(12): 2255-2260

[5] 杨铭鑫,李俊,同小娟,等. 2001—2020年中国森林植被EVI对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(23): 10850-10863

YANG M X, LI J, TONG X J, et al. Response of forest vegetation Enhanced Vegetation Index to climatic factors in China in 2001—2020[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10850-10863

[6] 刘宸瑄,王丽群,许行,等. 2001—2021年中国植被覆盖对夏季城市热岛效应的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(24): 11020-11034

LIU C X, WANG L Q, XU H, et al. The impact of vegetation cover on summer urban heat island effect in China from 2001 to 2021[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11020-11034

[7] YANG M, HE Z H, PI G N, et al. Spatiotemporal variations in MODIS EVI and MODIS LAI and the responses to meteorological drought across different slope conditions in karst mountain regions[J]. Sustainability, 2024, 16(17): 7870

[8] CHEN J H, YANG H, JIN T Y, et al. Assessment of terrestrial ecosystem sensitivity to climate change in arid, semi-arid, sub-humid, and humid regions using EVI, LAI, and SIF products[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111511

[9] HE D, YI G H, ZHANG T B, et al. Temporal and spatial characteristics of EVI and its response to climatic factors in recent 16 years based on grey relational analysis in Inner Mongolia autonomous region, China[J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 961

[10] 谷正楠,张震,胡克宏,等. 基于结构方程模型的安徽省归一化植被指数变化及影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12259-12267

GU Z N, ZHANG Z, HU K H, et al. Analysis on the normalized difference vegetation index change and influence factors in Anhui Province based on structural equation model[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(28): 12259-12267

[11] 刘欣华,张春霞,万芳. 内蒙古西部地区生态环境建设的成就与问题[J]. 内蒙古林业调查设计, 2002, 25(3): 19-20, 45

LIU X H, ZHANG C X, WAN F. Achievements and problems of ecological environment construction in western Inner Mongo-

- lia[J]. Inner Mongolia Forestry Investation and Design, 2002, 25(3):19-20,45
- [12] 周莹, 马龙, 刘廷玺, 等. 杜松树轮年表记录的192 a阴山地区最低气温变化[J]. 山地学报, 2021, 39(3):316-326
ZHOU Y, MA L, LIU T X, et al. Changes of minimum temperature recorded by *Juniperus*. tree ring chronology during 192a in the Yinshan Mountains area of China [J]. Mountain Research, 2021, 39(3):316-326
- [13] 闫文杰. 阴山自然环境变迁研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2022:93
YAN W J. Study on the changes of natural environment in Yinshan mountain[D]. Xi'an:Shaanxi Normal University, 2022:93
- [14] 李瑞, 樊明寿, 郑海春, 等. 基于产量水平的内蒙古阴山地区马铃薯施肥评价[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6):181-188
LI R, FAN M S, ZHENG H C, et al. Evaluation of potato fertilization based on yield level in Yinshan region of Inner Mongolia[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(6):181-188
- [15] 曹雪佳, 沈欣悦, 沈亲, 等. 云南省墨江县森林对虫害和干旱干扰的响应特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(7):57-63
CAO X J, SHEN X Y, SHEN Q, et al. Responses of forests to pest and drought disturbance in Mojiang county, Yunnan Province [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(7):57-63
- [16] KHAN M S, LIAQAT U W, BAIK J, et al. Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 252:256-268
- [17] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报, 2017, 37(9):2994-3008
DENG X Y, LIU Y, LIU Z H, et al. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of North-west China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9):2994-3008
- [18] 解哈, 同小娟, 李俊, 等. 2000—2018年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(11):4536-4549
XIE H, TONG X J, LI J, et al. Changes of NDVI and EVI and their responses to climatic variables in the Yellow River Basin during the growing season of 2000—2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11):4536-4549
- [19] YIN Y X, XU C Y, CHEN H S, et al. Trend and concentration characteristics of precipitation and related climatic teleconnections from 1982 to 2010 in the Beas River basin, India [J]. Global and Planetary Change, 2016, 145:116-129
- [20] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(9):1255-1268
MU S J, LI J L, CHEN Y Z, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001-2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9):1255-1268
- [21] HENSELER J, SARSTEDT M. Goodness-of-fit indices for partial least squares path modeling [J]. Computational Statistics, 2013, 28(2):565-580
- [22] SARSTEDT M, RINGLE C M. Structural equation models: from paths to networks (Westland 2019) [J]. Psychometrika, 2020, 85(3):841-844
- [23] 王茜, 陈莹, 阮玺睿, 等. 1982—2012年中国NDVI变化及其与气候因子的关系[J]. 草地学报, 2017, 25(4):691-700
WANG Q, CHEN Y, RUAN X R, et al. The changes of NDVI in China from 1982 to 2012 and its relationship with climatic factors[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(4):691-700
- [24] 孙瑞, 张方敏, 翁升恒, 等. 2001—2021年中国NDVI时空格局变化及对气候的响应[J]. 中国环境科学, 2023, 43(10):5519-5528
SUN R, ZHANG F M, WENG S H, et al. Spatio-temporal changes of NDVI and its response to climate in China from 2001 to 2021[J]. China Environmental Science, 2023, 43(10):5519-5528
- [25] 王欣, 贾国栋, 邓文平, 等. 季节性干旱地区典型树种长期水分利用特征与模式[J]. 应用生态学报, 2021, 32(6):1943-1950
WANG X, JIA G D, DENG W P, et al. Long-term water use characteristics and patterns of typical tree species in seasonal drought regions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(6):1943-1950
- [26] 耿庆国. 2003年全国气候概况[C]//2004年全国天灾预测总结学术会议文集. 北京:中国地球物理学会, 2004: 64-67
GENG Q G. Overview of national climate in 2003[C]//Proceedings of 2004 National Academic Conference on Natural Disaster Prediction Summary. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2004: 64-67
- [27] ZHANG X Y, WANG X Y, ZOHNER C M, et al. Declining precipitation frequency may drive earlier leaf senescence by intensifying drought stress and enhancing drought acclimation[J]. Nature Communications, 2025, 16:910
- [28] 王鑫, 刘新月, 母艳梅, 等. 毛乌素沙地植被物候变化及其对气候的响应[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(7):61-75
WANG X, LIU X Y, MU Y M, et al. Changes in vegetation phenology and its responses to climatic factors in the Mu Us Desert [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(7):61-75
- [29] 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
SUN G P, LIU X F, WANG X H, et al. Changes in vegetation coverage and its influencing factors across the Yellow River Basin during 2001-2020[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4):205-212
- [30] 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 等. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. 生态学报, 2018, 38(6):1908-1919
HU Z Y, ZHOU J J, ZHANG L L, et al. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6):1908-1919
- [31] 王邦锡, 黄久常, 王辉. 不同生长季节光照强度和温度对柠条叶片光合作用和呼吸作用的影响[J]. 中国沙漠, 1996, 16(2):145-148
WANG B X, HUANG J C, WANG H. Effects of light intensity and temperature on photosynthesis and respiration in leaves of *Caragana korshinskii* kom during different growth seasons[J]. Journal of Desert Research, 1996, 16(2):145-148