

王洋洋,王勇. 气候变化与人类活动对西北半干旱区植被动态的影响:以榆林地区为例[J]. 陕西气象,2026(3):49-55.

文章编号:1006-4354(2026)03-0049-07

气候变化与人类活动对西北半干旱区植被动态的影响——以榆林地区为例

王洋洋^{1,2},王 勇²

(1. 榆林市气象局,陕西榆林 719000;2. 南京信息工程大学生态与应用气象学院,南京 210044)

摘要:以西北半干旱区的榆林地区为例,基于 2001—2023 年的 MODIS-NDVI 数据与同期气象观测数据,运用趋势分析、偏相关分析和多元回归残差分析等方法,以归一化植被指数(normal difference vegetation index,NDVI)为表征,定量揭示榆林地区植被动态的时空变化规律,并进一步区分与评估气候变化与人类活动对该区域植被变化的相对贡献。结果表明:榆林地区 NDVI 总体呈增长趋势,且空间分布呈现东南高、西北低的特征。气候变化与人类活动的耦合作用是榆林地区植被增长的主要驱动力;降水因子与 NDVI 呈显著相关性($P \leq 0.05$),尤其在研究区东部;气温对 NDVI 的影响存在空间差异。此外,人类活动对榆林地区植被影响更明显,且人类活动对 NDVI 的贡献率达到 58.2%。

关键词:NDVI;气候因子;人类活动;残差分析

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

植被是地球生态系统的重要组成部分,作为连接土壤、水分与气候系统的关键纽带^[1],它直接参与并调控着地表的能量平衡、物质循环与水循环过程。因此,植被不仅对调节全球气候具有深远影响,也为人类提供不可或缺的生态系统服务^[2-3]。归一化植被指数(normal difference vegetation index,NDVI)是反映植被覆盖度、生物量、叶面积指数和土地利用状况的重要指标^[2-3],能够较好地反映一个地区的植被覆盖度和生长情况^[4]。基于时间序列的 NDVI 数据,研究植被覆盖变化规律及对外部扰动的响应机制,对深入认识植被变化规律和生态效应至关重要^[5]。

目前国内外研究主要集中在研究区域尺度 NDVI 与气候变化的内在联系及其对气候变化的响应机制^[6-11]。在我国西北部的干旱和半干旱地带,生态系统脆弱敏感,植被动态变化受气候变化和人类活动的影响显著。现有研究表明,降水是

该区域植被生长和恢复的主要驱动力^[12-13],其变化对植被生产力的影响尤为显著。随着人类活动强度增加,其影响日益凸显,已成为植被动态变化不可忽视的重要驱动因素之一^[14-15]。大尺度研究中,气候变化的主导作用因较强的空间均质性而易于识别^[16-17];在中小尺度,人类活动对植被的影响则更具影响力^[15,18-19]。然而,现有中小尺度研究多依赖单一数据源或短时序分析,缺乏对长时间序列下双因子交互作用的定量解析。MODIS-NDVI 数据凭借其适中的空间分辨率与长达 20 余年、覆盖全球的连续观测记录,为在中小尺度上实现长时间序列的植被动态监测与驱动力分析提供了理想的数据基础。

榆林地区地处毛乌素沙地南缘,是典型的生态过渡带,其植被变化不仅反映出该区域独特的气候变化特征,同时也深刻体现了人类活动对当地生态环境的显著影响。基于此,以西北半干旱

收稿日期:2025-03-21

作者简介:王洋洋(2003—),男,汉族,陕西榆林人,学士,助理工程师,研究方向为 GIS 与气象应用。

基金项目:中国气象服务协会气象科技创新平台项目(CMSA2023MC022);榆林市青年人才托举计划(20250777)

区的榆林地区为例,深入分析榆林地区气候变化和人类活动对植被生长的驱动机制,揭示西北半干旱区气候变化和人类活动与 NDVI 的内在反馈机制,为西北地区的生态恢复、自然环境保护以及区域生态与经济的协调发展提供科学依据和决策支持。

1 资料与方法

1.1 研究区域

榆林地区(107°28'E~111°15'E,36°57'N~39°34'N)位于陕西省最北部,地处毛乌素沙地和黄土高原的过渡带(图 1)。该地区属暖温带半干旱大陆性季风气候,受季风影响,气候季节性差异显著。年平均气温约 10℃,年平均降水量 400 mm 左右,且年内分布极不均匀。作为生态敏感区,榆林长期受到人类活动的影响。特别是近几十年来,为治理风沙和水土流失,一系列大规模的生态建设工程(如“三北”防护林、退耕还林还草等)在此实施,深刻改变了地表植被覆盖和生态演替进程,使其成为研究人类活动与植被互动的典型区域。

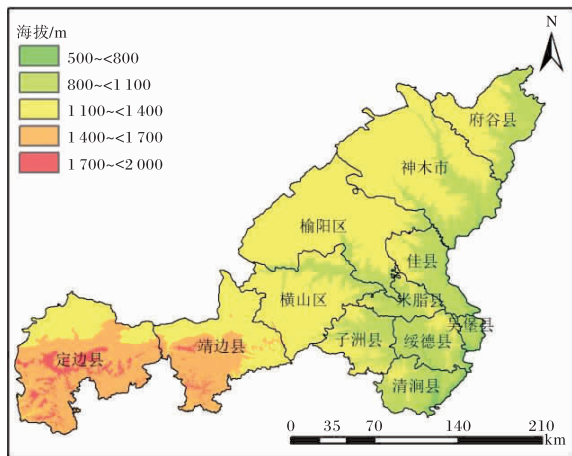


图 1 研究区域图(审图号为 GB(2022)1873,下同)

1.2 数据与处理

1.2.1 MODIS-NDVI 数据 2001—2023 年榆林地区 NDVI 数据来自 NASA 数据中心发布的 MOD13Q1 (<https://lpdaac.usgs.gov/>),该数据时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 250 m。使用 MRT(MODIS projection tool)工具进行影像数据的镶嵌、地图投影转换和裁剪等预处理,并通过最大值合成法计算年 NDVI。

1.2.2 气象数据 气象数据由榆林市气象局气象信息中心提供,涵盖 12 个气象站(榆阳区、神木市、横山区、府谷县、定边县、靖边县、绥德县、米脂县、子洲县、佳县、吴堡县、清涧县)2001—2023 年的逐年气象观测资料。运用克里金空间插值技术对年累计降水量和年平均气温插值,获取与 MODIS-NDVI 数据在空间分辨率及投影坐标系上相匹配的气候因子数据集。

1.3 方法

1.3.1 趋势分析 利用一元线性回归方法对榆林地区 23 a 间 NDVI 的时序变化进行拟合分析,再比较各像元变化趋势的空间差异,计算公式为:

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

式中: θ_{slope} 表示 NDVI 年际变化率; $n=23$ 表示总年份数; I_i 代表第 i 年 NDVI。 $\theta_{\text{slope}} > 0$ 表示 NDVI 呈现上升趋势,反之为下降趋势。

为评估趋势变化的显著性,对趋势分析结果进行 F 检验,计算公式如下。根据检验结果,按显著性水平将榆林地区 NDVI 变化趋势分为 5 个等级:极显著增加($\theta_{\text{slope}} > 0, P \leq 0.01$)、极显著减少($\theta_{\text{slope}} < 0, P \leq 0.01$)、显著增加($\theta_{\text{slope}} > 0, P \leq 0.05$)、显著减少($\theta_{\text{slope}} < 0, P \leq 0.05$)和变化不显著($P > 0.05$)。

$$F = U(n-2)/Q, \quad (2)$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{m}_i - \bar{I})^2, \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (I_i - \hat{m}_i)^2. \quad (4)$$

式中: U 为误差平方和; Q 为回归平方和; $\hat{m}_i$ 为第 i 年的回归值; $\bar{I}$ 为 2001—2023 年 NDVI 的平均值。

1.3.2 偏相关分析 采用偏相关分析方法来研究主要气候因子对 NDVI 的影响,即在控制其他气候变量影响的情况下,分析 NDVI 与单一气候变量的相关性^[18-19]。对计算得到的偏相关系数进行 t 检验,以判断研究区域 NDVI 与气候因子(气温、降水)之间的偏相关关系是否显著($P \leq 0.05$)。

1.3.3 多元回归残差分析 NDVI 变化除受气候变化的影响外,还受到人类活动的影响。通过应用多元回归残差分析法,旨在评估气候变化和人类活动对 NDVI 变化的影响,并量化它们的贡献比例^[20-21]。该方法首先构建一个多元线性回归模型,以 NDVI 为因变量,年累计降水量、年平均气温等关键气候因子为自变量,通过模型拟合得到仅受气候变化影响的 NDVI 的预测值(N_{CC}),以此表征气候变化对 NDVI 的独立作用^[22]。进而通过 NDVI 观测值(N_{obs})与 N_{CC} 的差值,得到 NDVI 残差(N_{HA}),该残差可表征人类活动对 NDVI 的作用。表达式如下:

$$N_{CC} = a \times T + b \times P + c, \quad (5)$$

$$N_{HA} = N_{obs} - N_{CC}。 \quad (6)$$

式中: N_{CC} 、 N_{obs} 、 N_{HA} 分别为 NDVI 的预测值、观测值、残差值; a 、 b 和 c 分别为多元回归模型中年平均气温、年累计降水量和常数项的回归系数; T 为年平均气温($^{\circ}\text{C}$); P 为年累计降水量(mm)。

1.3.4 NDVI 变化驱动因素厘定及相对贡献率分析 气候因子和人类活动均是驱动 2001—2023 年榆林地区 NDVI 变化的重要因素。为更加直观地揭示影像因素在空间上的差异性,本文基于 NDVI 变化的驱动因素判定标准^[23],对研究区进行分类和归因分析。基于驱动因素判定结果,计算气候变化和人类活动对 NDVI 变化的相对贡献率^[24]。

2 结果与分析

2.1 榆林地区 NDVI 的时空变化特征

2.1.1 时间变化特征 2001—2023 年榆林地区 NDVI 介于 0.33 ~ 0.60, 总体呈增长趋势。NDVI 主要经历了 2010—2013 年、2015—2016 年、2021—2022 年上升阶段,以及 2013—2015 年、2020—2021 年、2022—2023 年下降阶段。多年变化趋势分析结果表明,榆林地区 NDVI 趋于好转,以 0.009/a 的速率显著增加(图 2)。

2.1.2 空间分布及变化趋势 从榆林地区多年平均 NDVI 分布图(图 3)可知,榆林地区 NDVI 空间分布特征显著,NDVI 高值区域主要集中在榆林地区东南部(府谷县、绥德县、米脂县、子洲

县、佳县、吴堡县、清涧县),而低值区域主要分布在榆林地区西北部(榆阳区西部、神木市西部、横山区西部、定边县西北部、靖边县北部)。

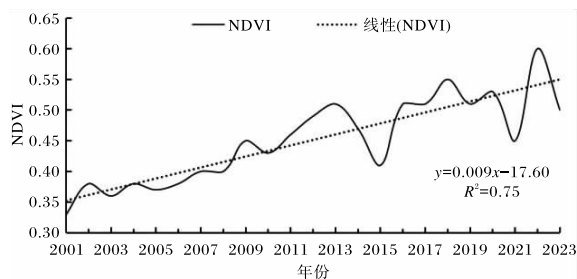


图 2 2001—2023 年榆林地区 NDVI 变化曲线

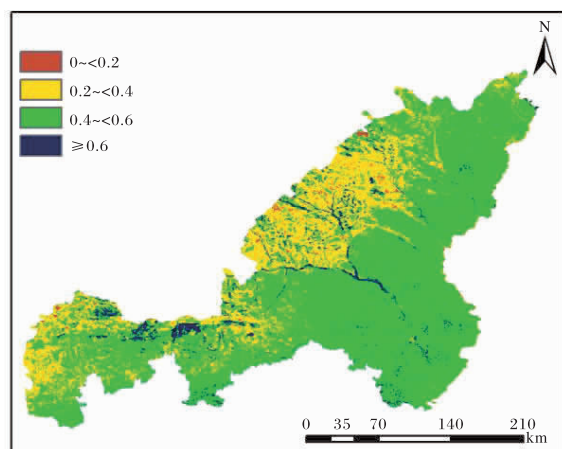


图 3 2001—2023 年榆林地区多年平均 NDVI 分布图

采用一元线性回归趋势法对 2001—2023 年 NDVI 的年际变化趋势进行逐像元拟合,并通过 F 检验评估其显著性,得到榆林地区 NDVI 变化趋势和显著性水平空间分布图(图 4)。如图 4 所示,2001—2023 年间,榆林地区 NDVI 总体呈现极显著增长趋势,覆盖约 84.2% 的区域。NDVI 极显著增加的区域集中分布在研究区的北部、南部、东部,以及西南部的一些零散地带;显著增加的区域零散分布于横山区中南部、府谷县、绥德县中部、米脂县东部、吴堡县南部,面积占比为 7.5%;呈减少趋势的区域面积占比相对较少,为 1.6%,以不显著减少趋势为主,主要分布在榆阳区、神木市等地区西部的零星区域;植被退化严重的区域最小且分散,分布于定边县、靖边县等地西南部。

2.2 榆林地区气候变化对 NDVI 的影响

为揭示降水和气温对 NDVI 的影响,分析 2001—2023 年 NDVI 与年累计降水量、年平均气

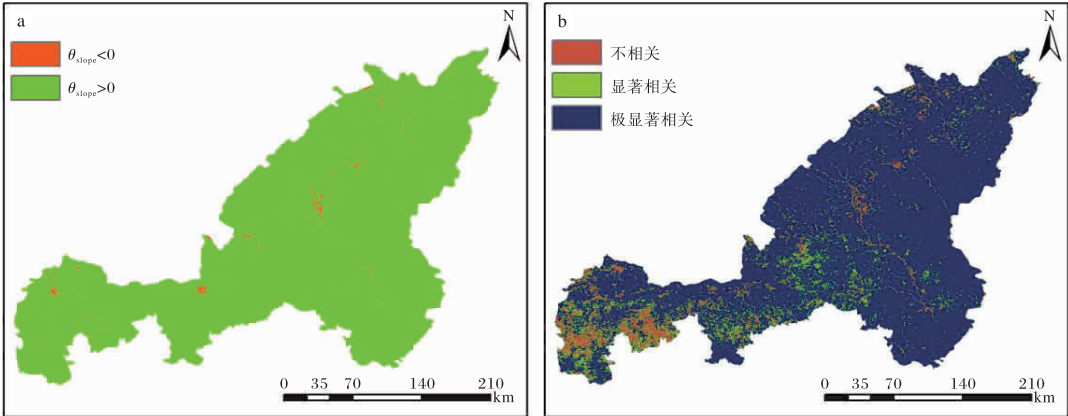


图 4 2001—2023 年榆林地区 NDVI 变化趋势(a)和趋势检验(b)

温的偏相关性,并进行显著性检验。结果显示,降水和气温对 NDVI 的影响在空间上存在显著差异性。由图 5 和表 1 可知,NDVI 与降水呈现显著正相关性的区域集中分布在北部的神木市东北部、府谷县,中部的榆阳区东部、佳县、米脂县,以及南部的横山区东南部、绥德县、子洲县、吴堡县、清涧县,面积占比达到 60.17%;NDVI 与降水量显著负相关的区域则较为零散且稀少,面积占比

仅为 0.10%。NDVI 与气温呈显著正相关性的区域主要分布在榆阳区西部、定边县和靖边县的北部地区,面积占比达到 6.76%;而 NDVI 与气温呈现显著负相关性的区域则零散分布于神木市,面积占比为 0.96%。NDVI 与气候因子的显著相关性分析结果表明,相比于气温,降水量对于榆林地区 NDVI 的影响程度更强。

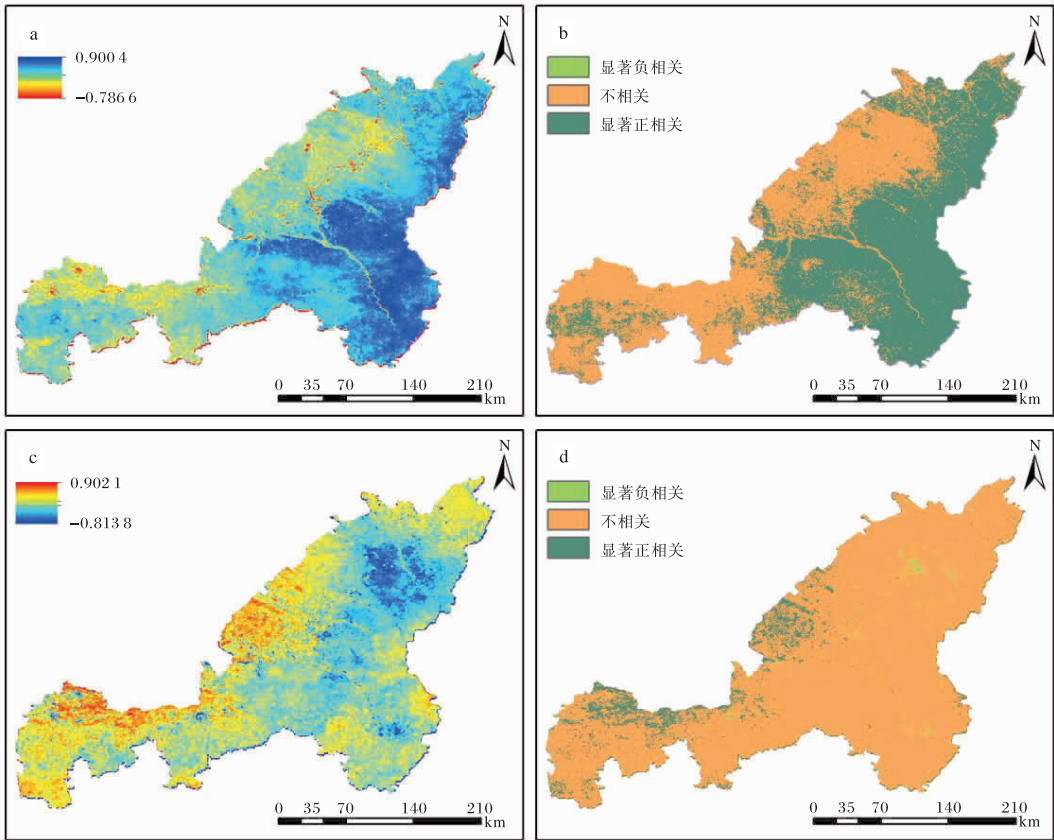


图 5 2001—2023 年榆林地区 NDVI 与降水(a,b)和气温(c,d)的相关性(a,c)和显著性(b,d)空间分布

表 1 2001—2023 年榆林地区 NDVI 与降水、气温的相关性统计

相关性	降水		气温	
	像元数/个	面积占比/%	像元数/个	面积占比/%
显著正相关	370 054	53. 27	46 961	6. 76
不相关	323 960	46. 63	641 111	92. 28
显著负相关	705	0. 10	6 647	0. 96

2.3 榆林地区 NDVI 变化驱动力分析

应用多元回归残差分析法,评估气候变化和人类活动对 NDVI 变化的影响。图 6 表明,气候变化和人类活动共同驱动榆林地区 NDVI 增加的面积占比为 95.74%,气候变化和人类活动共同驱动 NDVI 减少的面积占比仅为 0.95%,仅由气候变化驱动 NDVI 增加的面积占比为 0.23%,仅由人类活动驱动 NDVI 增加的面积占比为 2.44%,仅由气候变化驱动 NDVI 减少的面积为 0.25%,仅由人类活动驱动 NDVI 减少的面积占比为 0.39%。总体而言,近 23 年来,榆林地区 NDVI 的增长主要归因于气候变化和人类活动双重影响。

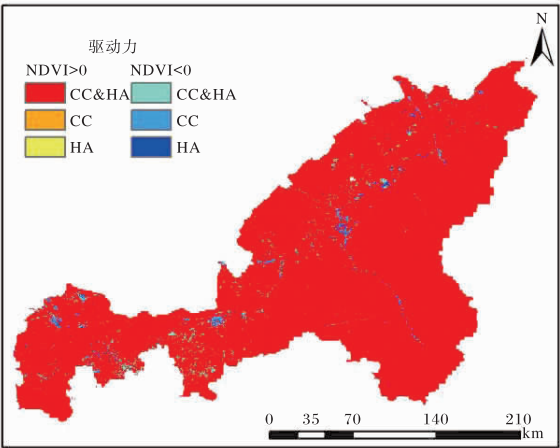


图 6 2001—2023 年榆林地区 NDVI 变化驱动因素的空间分布

2.4 不同驱动因素对 NDVI 变化的相对贡献

图 7a、表 2 表明,气候变化对榆林地区 NDVI 变化的贡献率为正的区域面积约占 96.05%。其中贡献率在 0~<20%和 20%~<40%范围的区域面积分别占总面积的 30.00%和 57.39%;而贡献率超过 40%的区域占比约为 8.66%,主要集中在

分布在定边县西南部、绥德县东部、佳县南部和吴堡县。气候变化对榆林地区 NDVI 变化的贡献率为负的区域面积仅占 3.95%,零散分布在定边县、靖边县等地区。

人类活动对榆林地区 NDVI 变化的贡献率为正的区域面积为 98.22%(图 7b、表 2)。其中人类活动的贡献率在 60%~<80%和超过 80%的区域面积分别占总面积的 55.60%和 32.39%;而贡献率在 0~<20%和 20%~<40%的区域主要集中在定边县南部、绥德县东部、佳县南部和吴堡县等地。人类活动对榆林地区 NDVI 的贡献率为负的区域面积相对较小,仅占总面积的 1.78%。结果表明,人类活动在高植被覆盖区域的影响尤为明显。使用面积加权法^[24],得出气候变化和人类活动对榆林地区平均 NDVI 变化的贡献分别约为 41.8%和 58.2%。

表 2 2001—2023 年气候变化和人类活动对榆林地区 NDVI 变化的贡献率面积占比统计 %

贡献率	气候变化	人类活动
<-20%	0.86	1.25
-20%~<0	3.09	0.53
0~<20%	30.00	0.12
20%~<40%	57.39	2.26
40%~<60%	7.85	7.85
60%~<80%	0.46	55.60
≥80%	0.35	32.39

3 结论与讨论

本文分析了 2001—2023 年榆林地区归一化植被指数(NDVI)的年际及空间变化特征,探究驱动榆林地区 NDVI 变化的主要因子,并深入研究气候变化与人类活动对 NDVI 变化的贡献率。

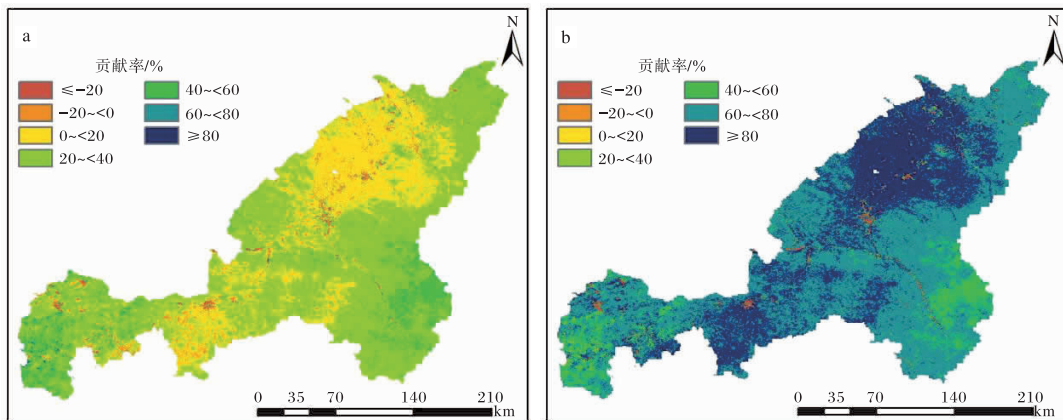


图7 2001—2023年气候变化(a)和人类活动(b)对榆林地区NDVI变化贡献率空间分布图

(1) 2001—2023年榆林地区NDVI增加显著,年均增长率为0.009/a,空间上呈现出东南高、西北低的分布特征。植被NDVI增长区域分布在榆林大部分地区;植被NDVI下降区域主要分布在定边县、靖边县等地西南部,榆阳区中部和神木市中西部的一些零散区域。

(2) 榆林地区植被受降水影响较为显著,而与气温因子的相关性不强。呈显著正相关的区域主要在榆阳区西部、定边县和靖边县的北部,显著负相关的区域零散分布于神木市。

(3) 气候变化与人类活动的耦合作用是榆林地区植被增长的主要驱动力。气候变化和人类活动对榆林地区NDVI的影响在不同区域呈现出明显的不一致性。其中,在定边县西南部、绥德县东部以及吴堡县等地,气候变化对NDVI变化的贡献率超过40%;在榆阳区中部、神木市、横山区西南部以及靖边县西南部等地,人类活动对NDVI变化的贡献率超过80%。整体来看,人类活动对NDVI的贡献率高达58.2%。可见,研究植被变化不可忽视人类活动的影响。

参考文献:

- [1] CAMILLE P, GARY Y. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. *Nature*, 2003, 421(6918): 37-42.
- [2] 郭锐. 植被指数及其研究进展[J]. *干旱气象*, 2003, 21(4): 71-75.
- [3] 王正兴, 刘闯, HUETE Alfredo. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. *生态学*
- 报, 2003, 23(5): 979-987.
- [4] 徐浩杰, 杨太保. 柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 398-409.
- [5] 刘鹏举, 袁卓慧, 胡业翠. 山水林田湖草生态保护修复工程第一批试点区NDVI时空分布与影响因素分析[J]. *生态经济*, 2019, 35(7): 196-202.
- [6] 冯露, 岳德鹏, 郭祥. 植被指数的应用研究综述[J]. *林业调查规划*, 2009, 34(2): 48-52.
- [7] 朴世龙, 方精云. 1982—1999年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. *地理学报*, 2003, 58(1): 119-125.
- [8] 宋怡, 马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 89-93.
- [9] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近30年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 47-58.
- [10] LI M Z, TUCKER C J, KAUFMANN R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D17): 20069-20083.
- [11] 张震, 刘广亮, 田步万, 等. 吴起县归一化植被指数时空变化趋势及对气候变化的响应[J]. *陕西气象*, 2025(1): 66-70.
- [12] 张晶, 郝芳华, 吴兆飞, 等. 植被物候对极端气候响应及机制[J]. *地理学报*, 2023, 78(9): 2241-2255.
- [13] 林隆超, 王晓飞, 刘延平, 等. 退耕还林工程背景下延安植被覆盖时空变化及其对气候的响应[J].

- 陕西气象,2022(4):1-6.
- [14] 郑亚平,张俊华,田惠文,等. 大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制[J]. 环境科学,2024,45(4):2268-2279.
- [15] 王娟,何慧博. 气候变化和人类活动对陕北退耕还林区植被 NPP 的影响[J]. 陕西气象,2025(2):32-37.
- [16] 朱会利,杨改河,韩磊. 延安市退耕过程植被覆盖度变化及其影响因子分析[J]. 农业机械学报,2015,46(8):272-280.
- [17] 李焱,巩杰,戴睿,等. 藏西南高原植被覆盖时空变化及其与气候因素和人类活动的关系[J]. 地理科学,2022,42(5):761-771.
- [18] 李玉辰,李宗省,张小平,等. 祁连山国家公园植被时空变化及其对人类活动的响应[J]. 生态学报,2023,43(1):219-233.
- [19] DENG X J, HU S, ZHAN C S. Attribution of vegetation coverage change to climate change and human activities based on the geographic detectors in the Yellow River Basin, China. [J]. Environmental science and pollution research international, 2022, 29(29):44693-44708.
- [20] 王涛,白红英. 秦岭山地植被 NDVI 对气候变化与人类活动的响应[J]. 山地学报,2017, 35(6): 778-789.
- [21] EVANS J, GEERKEN R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4): 535-554.
- [22] WESSELS K J, PRINCE S D, MALHERBE J, et al. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 68(2): 271-297.
- [23] SUN W Y, SONG X Y, MU X M, et al. Spatio-temporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 209/210(1): 87-99.
- [24] 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):961-974.