

DOI: 10.20103/j.stxb.202210233017

燕丹妮, 武心悦, 王博恒, 郝红科. 1982—2015 年黄土高原植被变化特征及归因. 生态学报, 2023, 43(23): 9794–9804.

Yan D N, Wu X Y, Wang B H, Hao H K. Characteristics and driving forces of changes in vegetation coverage on the Loess Plateau, 1982—2015. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9794–9804.

1982—2015 年黄土高原植被变化特征及归因

燕丹妮¹, 武心悦¹, 王博恒², 郝红科^{1,*}

¹ 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

² 国家林业和草原局华东调查规划院, 杭州 310021

摘要: 黄土高原植被对于黄河中下游泥沙量减少以及区域生态安全维持发挥着重要作用。气候变化和人类活动是驱动黄土高原植被覆盖度变化的两大因素, 然而先前研究多基于统计方法建立植被覆盖度与气候变化的线性关系, 忽略了植被覆盖度与气候变化之间复杂的非线性关系, 限制了对黄土高原植被变化驱动机制的理解。基于 1982—2015 年黄土高原植被覆盖度 (GIMMS NDVI) 数据, 以 1999 年退耕还林工程开始实施为界限, 采用随机森林和残差阈值法等手段量化并分析了 1982—2015 年植被变化特征及气候变化和人类活动对植被变化的影响。结果表明: (1) 1982—2015 年黄土高原植被覆盖度整体上呈现增长趋势, 1999 年之后植被覆盖度增加的面积大于 1999 年之前, 1999 年以前显著增长的区域只占总面积的 54.68%, 1999 年以后显著增长的区域面积占比增长至 85.11%; (2) 在考虑时滞效应的基础上, 1982—1998 年黄土高原超过 80% 的区域的逐月温度、降水、日照时数与植被覆盖度存在显著的正相关关系, 表明 1999 年以前植被覆盖度变化主要与气候变化有关。随机森林算法能较好地模拟植被覆盖度与气候因子之间的关系, 99.71% 的区域拟合的决定系数 R^2 达到 0.5 以上; (3) 2000—2015 年, 气候因素和人类活动对植被覆盖度的影响具有空间异质性。人类活动对植被覆盖度产生积极影响的面积增加了 55.94%, 气候消极影响的面积减少了 42.58%, 气候积极影响的面积减少了 12.86%。研究提出的量化气候变化与人类活动对植被覆盖度影响的方法能够更好的区分黄土高原植被覆盖度变化的驱动因素, 为黄土高原生态建设以及黄河流域的生态安全和高质量发展提供数据支撑。

关键词: 黄土高原; 气候变化; 人类活动; 植被变化; 残差阈值

Characteristics and driving forces of changes in vegetation coverage on the Loess Plateau, 1982—2015

YAN Danni¹, WU Xinyue¹, WANG Boheng², HAO Hongke^{1,*}

¹ College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

² East China Inventory and Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 310021, China

Abstract: Vegetation coverage on the Loess Plateau plays an important role in reducing soil sediment in the middle and lower reaches of the Yellow River and in sustaining regional ecological functions. Climate change and human activity are two important factors that drive changes in vegetation coverage on the Loess plateau. Previous researchers used statistical methods to describe the linear relationships between vegetation coverage and climate change on the plateau. However, these studies typically ignored the complicated nonlinear relationships between vegetation coverage and climate change; thus, their understanding of the mechanisms behind changes in vegetation coverage was limited. Therefore, in the present paper, the impacts of climate change and human activities on vegetation changes on the Loess Plateau from 1982 to 2015 were quantified and analyzed using a random forest algorithm and the residual threshold method with GIMMS NDVI data. The

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0600500)

收稿日期: 2022-10-23; **网络出版日期:** 2023-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hhk2018@126.com

results showed the following: (1) Vegetation coverage on the Loess Plateau presented an overall increasing trend from 1982 to 2015. Only 54.68% of the total area showed a significant increase in vegetation before 1999, while this area reached 85.11% after 1999; (2) From 1982 to 1998, the monthly temperature, precipitation, and sunshine hours had a significantly positive correlation with vegetation coverage in more than 80% of the total area of the Loess plateau, indicating that vegetation coverage changes before 1999 were mainly caused by climate change. Using a random forest algorithm, the accuracy of a simulation of 99.71% of the area was above 0.5; (3) From 2000 to 2015, the impacts of climate factors and human activities on vegetation coverage were significantly spatially heterogeneous. The positive driving effect of human activities on vegetation coverage increased by 55.94%, while the negative and positive driving effects of climate-related factors decreased by 42.58% and 12.86%, respectively. The driving factors of changes in vegetation cover on the Loess Plateau can be best described by the method proposed in this study, which quantifies the impact of climate change and human activities on vegetation coverage and provides data support for ecological construction on the Loess Plateau.

Key Words: the Loess Plateau; climate change; human activities; vegetation change; residual threshold

黄土高原位于中国半湿润、干旱与半干旱区过渡带,水资源短缺,生态环境脆弱,对气候变化响应敏感,是我国水土保持重点区域^[1-2]。黄河中游流经的黄土高原,是入黄泥沙的主要来源,因此黄土高原植被覆盖度对水土流失的防治关系到黄河流域的可持续发展^[3-4]。一方面,植被作为陆地生态系统的组成部分,在截留降雨、增加土壤入渗、减少水土流失以及指示全球气候变化和生态系统变化方面有重要作用^[5-7];另一方面,植被破坏导致的生态环境持续恶化将加剧水土流失,造成黄河下游河道泥沙不断淤积^[8-9]。虽然大规模人工造林提高了黄土高原植被覆盖度,但也有证据表明在人类活动和气候变化双重影响下,大规模的植被恢复使得降水被植被冠层截留蒸发,部分造林密度较大的区域土壤呈区域性干燥化^[10-12]。因此,在气候变化和人类活动影响下,黄土高原区植被动态变化日趋复杂,如何量化植被变化特征及其归因对区域生态安全至关重要。

气候变化和人类活动被公认为是影响黄土高原植被覆盖度变化的两个重要因素^[13-14]。土地利用类型、经济发展、人口、农业生产等数据常作为人类活动的重要指标量化人类活动对植被覆盖度变化的贡献率^[15-16]。温度、降水和辐射作为主要的气候因素已被广泛的用作驱动植被覆盖度变化的气候指标^[17]。此外,地貌、植被类型等自然因素也作为影响气候驱动力的限制性因素应用于对植被覆盖度变化的影响因素量化中^[18]。也有研究针对多因子交互作用,判断和说明多种气象因子共同作用下和独立作用下对植被归一化植被指数(NDVI)的解释度^[19-21]。除此之外,为探究退耕还林对植被恢复的影响效果,利用基于面板数据修正标准误差(PCSE)修正的面板数据模型将退耕还林面积作为表征退耕还林影响力的指标^[22]。这些研究都有力地推动了对植被覆盖度变化与气候变化及人类活动耦合关系的认识。目前对于气候变化与人类活动对植被覆盖度变化的贡献率还存在一定的不确定性,这与研究基于的时间尺度、参与拟合关系的驱动因素以及植被覆盖度变化与气候因素拟合关系的可靠性有关^[23]。

以往研究中,利用多元统计方法建立植被覆盖度与气候变化之间的关系,忽略了植被覆盖度与气候因素之间复杂的交互作用。在全球气候变化加剧的情况下,受多种环境因子影响的植被覆盖度变化并不是完全的线性关系,例如当增温超过光合作用的最适温度时,温度对植被的生长产生抑制作用,升温促进土壤水分蒸散,形成干旱环境,也会抑制植被的生长^[24-26]。目前被广泛应用的多元残差分析法,大多在当期受气候变化和人类活动共同影响的时间段内,建立植被覆盖度与气候变化之间的关系^[27-30]。这一关系的建立忽略了前期气候变化对植被覆盖度的潜在影响。黄土高原地区的气候变化和人类活动交互作用显著,简单的线性关系不能很好的建立植被覆盖度变化与人类活动之间的关系^[31-32]。在退耕还林工程实施以前,人类活动主要为长期农业行为,对植被覆盖度的影响是微弱的,植被覆盖度变化主要受气候影响^[33]。1999年之后,退耕还林工程的实施使得黄土高原的植被覆盖状况得到了明显改善,人类活动显著增强,成为影响黄土高原植被覆盖度变化的主要因素^[34]。利用线性模型尚不能很好地量化气候变化和人类活动对植被变化的影响,亟待寻找

新的量化方法研究黄土高原植被动态变化规律。

黄土高原是我国生态安全屏障的重要组成部分,也是我国退耕还林工程重点实施区域。本研究以退耕还林工程 1999 年为界限,利用非线性随机森林算法建立 1982—1998 年植被覆盖度与气候变化的关系,并用这一关系量化 1999—2015 年受气候变化驱动的植被覆盖度变化,植被覆盖度观测值与预测值的残差值为人类活动驱动的植被覆盖度变化。本研究的目的是:(1)探究退耕还林工程前后植被覆盖度的时空变化格局;(2)建立具有高拟合结果的植被覆盖度变化与气候因素关系;(3)量化气候变化与人类活动对黄土高原植被覆盖度变化的贡献。研究结果能为量化气候变化和人类活动对植被覆盖度的影响提供新思路,为黄土高原地区生态建设提供理论支持和科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区

黄土高原(100°83′—114°52′E,33°68′—41°27′N)位于中国西北部(图 1),横跨青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西和河南七省区,海拔高度 81—5010 m,总面积约 65 万 km²,总人口约 8600 万。黄土高原属东南湿润季风气候向西北内陆干旱气候的过渡区,从东南向西北气候依次为半湿润气候、半干旱气候和干旱气候,冬季和春季寒冷干燥,夏季和秋季炎热且多极端降雨。年均温为 9—12℃,空间分布不均匀,西部地区温度低于东部地区,年均降雨量 100—800 mm。植被类型主要有草地、灌丛、农田、落叶阔叶林和常绿针叶林。黄土高原是我国典型的水土流失地区,也是退耕还林的重点地区^[35—37]。为有效治理和解决严重的生态系统退化和水土流失问题,中国政府实施了全球规模最大的退耕还林还草生态治理工程。1999 年,四川、陕西、甘肃 3 省率先开展了退耕还林试点示范工程^[38]。2002 年,在试点成功的基础上,退耕还林工程全面启动^[39]。

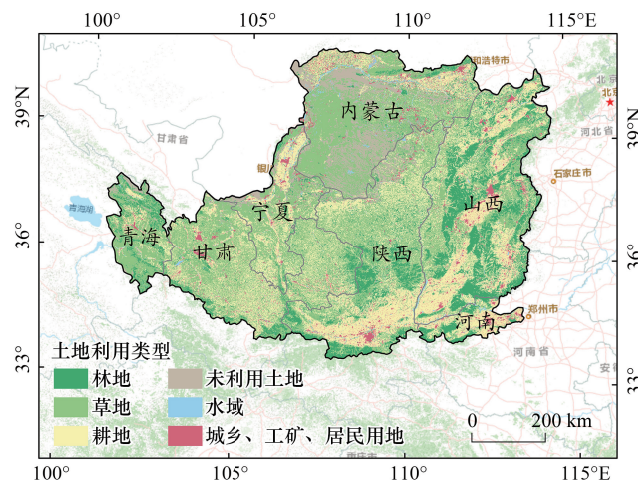


图 1 黄土高原 2000 年土地利用类型

Fig.1 Land use types on the Loess Plateau in 2000

1.2 数据来源

研究采用归一化植被指数(NDVI)作为植被覆盖度指标,NDVI 数据集来源于 GIMMS NDVI3g V1.0 全球数据产品(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>)。时间序列为 1981—2015 年,空间分辨率为 8 km,时间分辨率为 15 d。温度与降水数据集来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 1 月。日照时数数据集来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>),空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 1 月。土地利用数据集来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km。通过 Python 进行空间插值重采样将 NDVI、温度、降水、日照时数数据空间分辨率统一为 8 km,并通过平均值计算获取 1982—2015 年逐月 NDVI、温度、降水、日照时数数据。

1.3 植被覆盖度变化趋势分析

基于线性回归分析法,建立 1982—1998 年逐月 NDVI 与 1、2、3 月滞后温度、降水和日照时数的线性关系,得到 NDVI 与气候因素的时滞关系。逐像元计算植被覆盖度与时间的趋势线变化斜率(Slope),得到植被覆盖度的变化趋势。利用 Pearson 相关系数来判断相关性:

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^N i X_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中, X_i 表示第 i 年的 NDVI 平均值, n 为研究期总年数。Slope>0 和 Slope<0 分别表示 NDVI 随时间递增和递减。并对植被覆盖度变化趋势进行显著性检验, $P<0.05$ 表示变化显著, $P>0.05$ 表示变化不显著。

1.4 植被覆盖度与气候因素偏相关性分析

应用偏相关系数反映 1982—1998 年植被覆盖度与相应滞后气温、降水和日照时数的相关性:

$$r_{yj,ck} = \frac{r_{yj,c} - r_{yk,c} r_{jk,c}}{\sqrt{(1 - r_{yk,c}^2)(1 - r_{jk,c}^2)}} \quad (2)$$

式中, $r_{yj,ck}$ 表示排除 c 、 k 影响后, y 与 j 的二阶偏相关系数, $r_{yj,c}$ 、 $r_{yk,c}$ 、 $r_{jk,c}$ 分别表示排除 c 影响后 y 与 j 、 y 与 k 、 j 与 k 之间的一阶偏相关系数,显著性检验采用 t 检验。

1.5 随机森林算法

利用随机森林算法拟合 1982—1998 年气候变化驱动的植被覆盖度变化。随机森林是由很多决策树构成的,通过对部分样本进行训练,森林中的每一颗决策树分别进行判断和分类,决策树中分类结果最多的那一个分类结果将作为随机森林的最终结果^[40]。基于 Python 3.9 软件,利用随机森林算法对标准化后的数据进行训练和预测,本文设置参数 $n_estimators=200$, $random_state=0$,其它参数使用默认值。训练 1982—1996 年逐月 NDVI 与滞后气候因素(温度、降水和日照时数)之间的非线性关系,并将 1997—1998 年逐月 NDVI 与滞后气候因素(温度、降水和日照时数)作为测试集,验证模型精度:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

式中, y_i 为实测数值,其均值为 $\bar{y}$,拟合值为 $\hat{y}$, R^2 的值越接近 1,说明随机森林算法对观测值的拟合程度越好;反之, R^2 的值越小,说明随机森林算法对观测值的拟合程度越差,当 $R^2<0$ 时,意味着过拟合。训练集的 R^2 能够反映随机森林算法对关系的模拟效果,测试集的 R^2 能够反映随机森林算法对关系的泛化能力。利用随机森林算法训练的 1982—1998 年逐月 NDVI 与滞后气候因素(温度、降水和日照时数)之间的非线性关系预测 1999—2015 年受气候变化驱动的植被覆盖变化。

1.6 残差阈值法

利用残差阈值法划分出 1999—2015 年人类活动驱动的植被覆盖度变化,首先计算未被模拟到的植被覆盖度变化值,即 NDVI 观测值与随机森林算法预测值之差:

$$\text{NDVI}_{\text{res}} = \text{NDVI}_{\text{obs}} - \text{NDVI}_{\text{pre}} \quad (4)$$

式中, NDVI_{pre} 和 NDVI_{obs} 分别为 1999—2015 年基于随机森林学习算法的 NDVI 预测值和基于遥感影像的 NDVI 观测值, NDVI_{res} 表示 1999—2015 年未被模拟到的植被覆盖度变化值。计算 1982—1998 年残差值的平均值(μ)与 n 倍标准差(σ),气候变化导致的波动范围为 $[\mu - n \times \sigma, \mu + n \times \sigma]$ 。若 1999—2015 年残差值落入 $[\mu - n \times \sigma, \mu + n \times \sigma]$ 范围内,则认为气候因素是主要的驱动因子,反之,残差值落到范围外,则为人类活动是主要的驱动因素。

$$\text{主要驱动因子} = \begin{cases} \text{人类消极影响, } \text{NDVI}_{\text{res}} < \mu - n \times \sigma \\ \text{气候影响, } \mu - n \times \sigma < \text{NDVI}_{\text{res}} < \mu + n \times \sigma \\ \text{人类积极影响, } \text{NDVI}_{\text{res}} > \mu + n \times \sigma \end{cases} \quad (5)$$

式中,对于 n 一般取值为 1, 2 和 3 (本研究 n 取 2), n 的取值越大表明气候因素驱动的植被覆盖度波动性越大。对于大部分的网格,其研究月份中近 50% 的时间,残差落入 $[\mu - n \times \sigma, \mu + n \times \sigma]$ 范围内,气候因素驱动植被覆盖度变化的效果属于正常的波动范围。在超过正常波动范围以外的 $(-\infty, \mu - n \times \sigma)$ 认为人类活动对植被覆盖度的影响为消极,相应的,在超过正常波动范围以外的 $(\mu + n \times \sigma, +\infty)$ 认为人类活动对植被覆盖度的影响为积极。依据 n 的取值对人类活动的影响程度进行细致划分, n 值越大表示波动越剧烈,对植被覆盖的影响程度越深,将人类活动细致划分为六类:人类重度消极影响,人类中度消极影响,人类轻度消极影响,人类轻度积极影响,人类中度积极影响和人类重度积极影响。对于气候因子为主要驱动因子的区域,利用 Pearson 分析的时间变化趋势为判断气候驱动效果的依据。Slope 为正,气候因子对植被覆盖度的影响是积极的;Slope 为负,气候因子对植被覆盖度的影响是消极的。

1.7 技术路线

本研究主要分为三步(图 2)。首先,利用偏相关分析法分析 1982—1998 年逐月植被覆盖度与滞后气候因素的偏相关关系,验证植被覆盖度与气候因素的相关性。其次,验证随机森林算法对植被覆盖度与气候因素关系的拟合效果。利用随机森林算法训练 1982—1996 年植被覆盖度与气候因素的关系,基于这一模拟好的关系,利用气象因素预测 1997—1998 年的植被覆盖度,根据预测值与观测值计算拟合精度。最后,对 1999—2015 年生长季植被覆盖度的驱动因素进行归因分解。利用随机森林算法预测 1999—2015 年受气候变化驱动的植被覆盖度变化,即植被覆盖度变化预测值。植被覆盖度的观测值与预测值之差为残差值,根据植被覆盖度残差值(1999—2015 年)是否处于 $[\mu - n \times \sigma, \mu + n \times \sigma]$ 波动范围内判断主要的驱动因子是气候变化还是人类活动。前两步分析针对全年逐月数据,第三步 2000—2015 年植被变化的归因针对生长季(5—10 月)分析。

2 结果与分析

2.1 黄土高原植被覆盖度空间变化

1982—1998 年,黄土高原植被覆盖度整体上呈增长趋势(图 3)。97.81% 的区域植被覆盖度随时间呈现

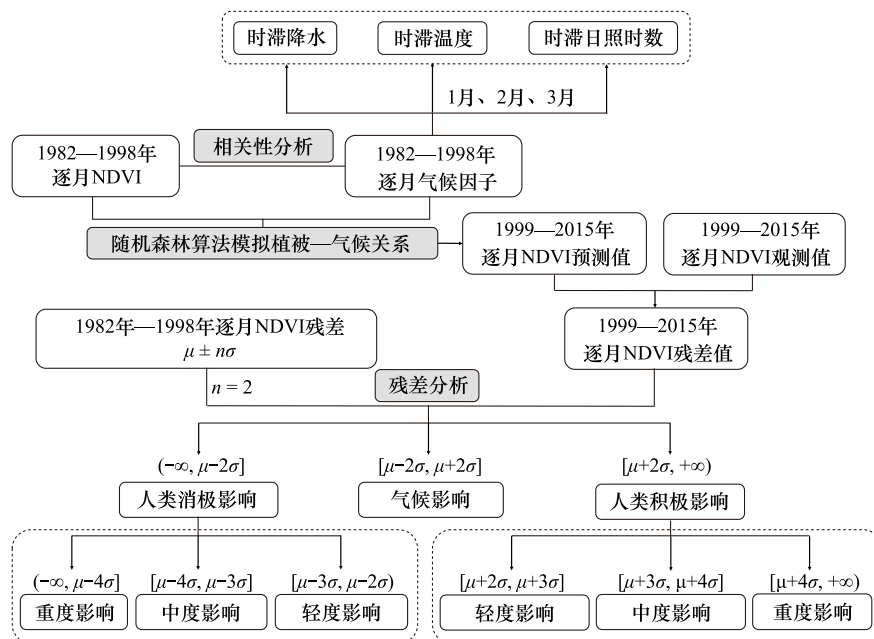


图 2 技术路线

Fig.2 Technical route

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; μ : 1982—1998 年逐月 NDVI 残差值的平均值; σ : 1982—1998 年逐月 NDVI 残差值的标准差; n : 标准差倍数, 取值为 2, 3, 4

增长趋势,其中,显著增长区域占总面积的 54.68%。2.19%的区域植被覆盖度随时间呈现减少趋势,但没有呈现显著减少趋势的区域。减少区域主要发生在山西中部、内蒙古、甘肃和宁夏部分区域。这表明黄土高原大部分地区植被覆盖度随时间呈现增长趋势。1999—2015 年,黄土高原植被覆盖度整体上呈现增长趋势,96.42%的区域随时间呈现增长趋势,显著增长区域占总面积的 85.11%,3.56%的区域呈现减少趋势。减少区域主要发生在宁夏北部、陕西南部、内蒙古和河南部分区域。1999—2015 年与 1982—1998 年相比,植被覆盖度增长的区域更多,增长的趋势也更显著,这表明 1999 年开始国家实施的“退耕还林”等维护生态安全的政策促进了黄土高原植被覆盖度的增加。

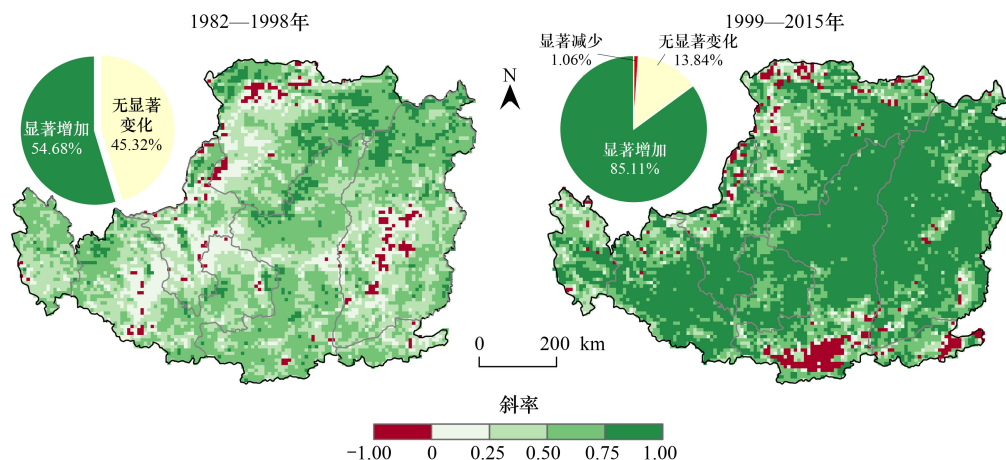


图 3 1982—1998 年、1999 年—2015 年植被覆盖度空间变化及显著性 ($P < 0.05$)

Fig.3 Spatial variation and significance of vegetation cover during 1982—1998 and 1999—2015 ($P < 0.05$)

2.2 植被覆盖度与气候变化关系及拟合精度

黄土高原 1982—1998 年逐月 NDVI 与降水和日照时数存在 1 个月的滞后效应,而温度与当期的植被覆盖度相关性更好。对植被覆盖度变化与相应的滞后气候因素进行偏相关性分析。在整体上,黄土高原植被覆盖度与温度、降水和日照时数表现出很高的相关性(图 4),温度与植被覆盖度的相关性高于降水和日照时数,与温度显著正相关的植被覆盖度区域面积大于降水和日照时数。不同气候因素对植被覆盖度的影响具有空间异质性,温度与植被覆盖度相关性空间分布与降水相反,温度与植被覆盖度相关性高的区域,降水与植被覆盖度的相关性低。黄土高原植被覆盖度与温度呈正相关的区域占 99.44%,表现为显著正相关的区域占 98.49%,表现为显著负相关的区域占 0.15%。表现为显著负相关和无显著相关性的区域主要分布在内蒙古东胜市西北部。黄土高原植被覆盖度与降水呈正相关的区域占 94.50%,其中表现为显著正相关的区域占 87.47%,表现为显著负相关的区域占 1.15%。表现为显著负相关和无显著相关性的区域主要分布在陕西南部、山西南部 and 河南的部分区域。黄土高原植被覆盖度与日照时数呈正相关的区域占 93.63%,其中表现为显著正相关的区域占 83.36%,表现为显著负相关的区域占 1.84%。表现为显著负相关的区域主要分布在陕西南部、山西和河南的部分区域,其它大部分区域表现为显著正相关。这表明 1999 年以前,黄土高原超过 80% 的区域植被覆盖度与气候因素呈现显著的正相关关系。

1982—1998 年植被覆盖度与气候变化关系的整体训练精度达到 80% 以上,表明随机森林算法整体上较好地模拟了植被覆盖度和气候变化之间的关系。99.71% 的区域测试精度达到 0.5 以上,表明随机森林算法模拟的植被覆盖度和气候变化之间的关系能够较好的应用于测试集。尽管 0.01% 的区域存在过拟合 ($R^2 < 0$),整体上随机森林算法较好地拟合了气候变化与植被覆盖度之间的关系(图 5)。

2.3 黄土高原植被覆盖度变化归因分析

2000—2015 年,气候因素对植被覆盖度的驱动效应逐渐减弱,人类活动对植被覆盖度的驱动效应逐渐增

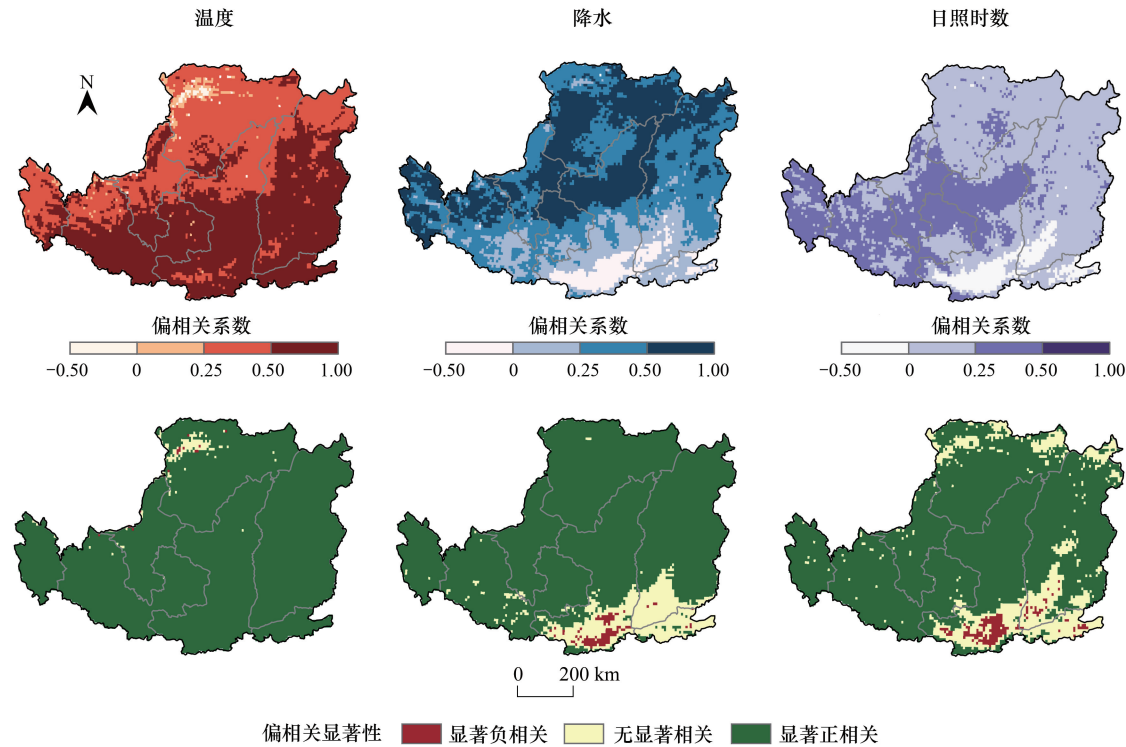


图 4 1982—1998 年植被覆盖度与滞后温度、降水及日照时数的偏相关系数及显著性 ($P<0.05$)

Fig.4 Partial correlation coefficient and significance of vegetation cover with lag temperature, precipitation and sunshine hours from 1982 to 1998 ($P<0.05$)

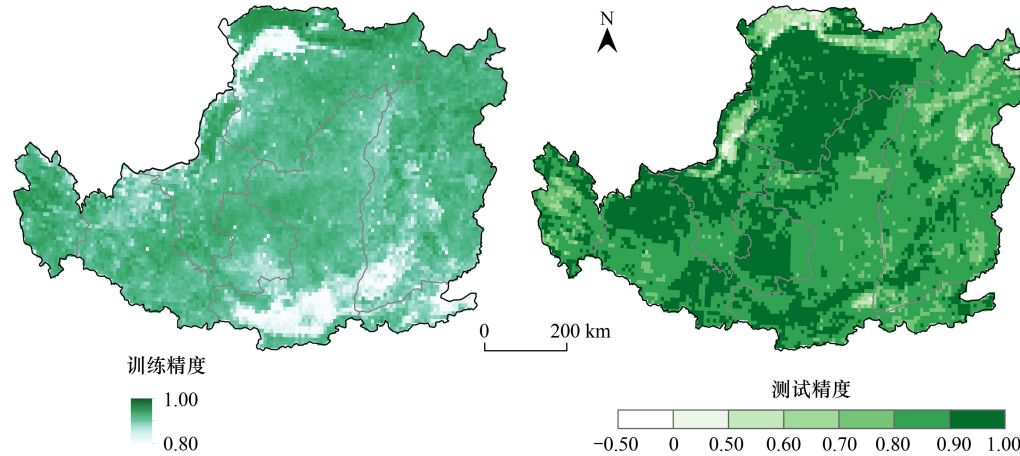


图 5 随机森林学习算法训练精度与测试精度

Fig.5 Training accuracy and test accuracy of random forest learning algorithm

加(图 6)。气候变化对植被覆盖度的驱动面积占比由 90.12%降低为 34.67%。人类活动对植被覆盖度的积极驱动面积占比由 8.68%增加为 64.62%。气候变化对植被覆盖度的消极驱动面积占比降低了 42.58%,积极驱动面积占比降低了 12.86%。人类活动对植被覆盖度变化的影响逐步加深,在 2012—2013 年达到顶峰,2014 年以后,人类活动的影响逐渐减弱,气候变化对植被覆盖度的影响开始增强。气候驱动植被覆盖度变化的地区主要分布在内蒙古临河市南部和东胜市西部、陕西南部、山西东南部、河南以及青海部分区域,在这些

区域植被覆盖度存在降低趋势(图 7)。人类活动积极影响的区域主要分布在内蒙古东胜市东部、宁夏部分区域、陕西北部、山西东北部,接着向甘肃东部、青海、山西中部扩展,并且影响程度逐步加深,这些区域植被覆盖度增加趋势较大。人类活动的消极影响面积占比呈现波动性,主要分布在内蒙古东胜市西部、宁夏北部和中部、甘肃平凉市,这些区域植被增长趋势较弱或呈现降低趋势。

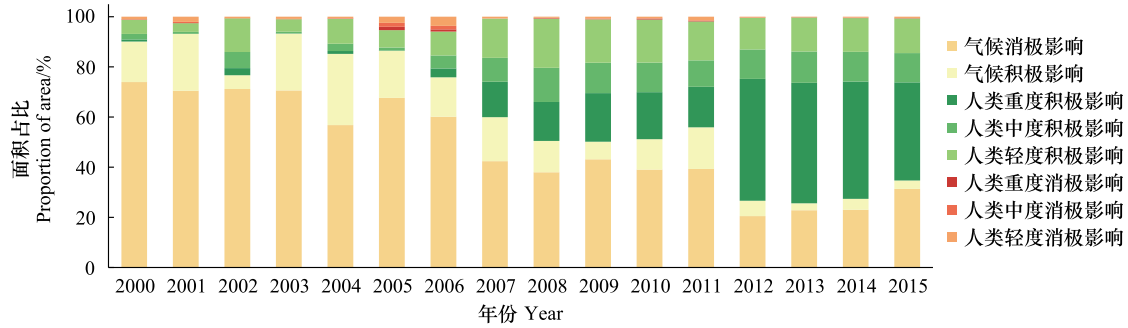


图 6 2000—2015 年生长季(5—10 月)气候变化与人类活动驱动植被覆盖度变化的面积占比

Fig.6 Proportion of vegetation cover changes driven by climate change and human activities during the growing season (May—October) from 2000 to 2015

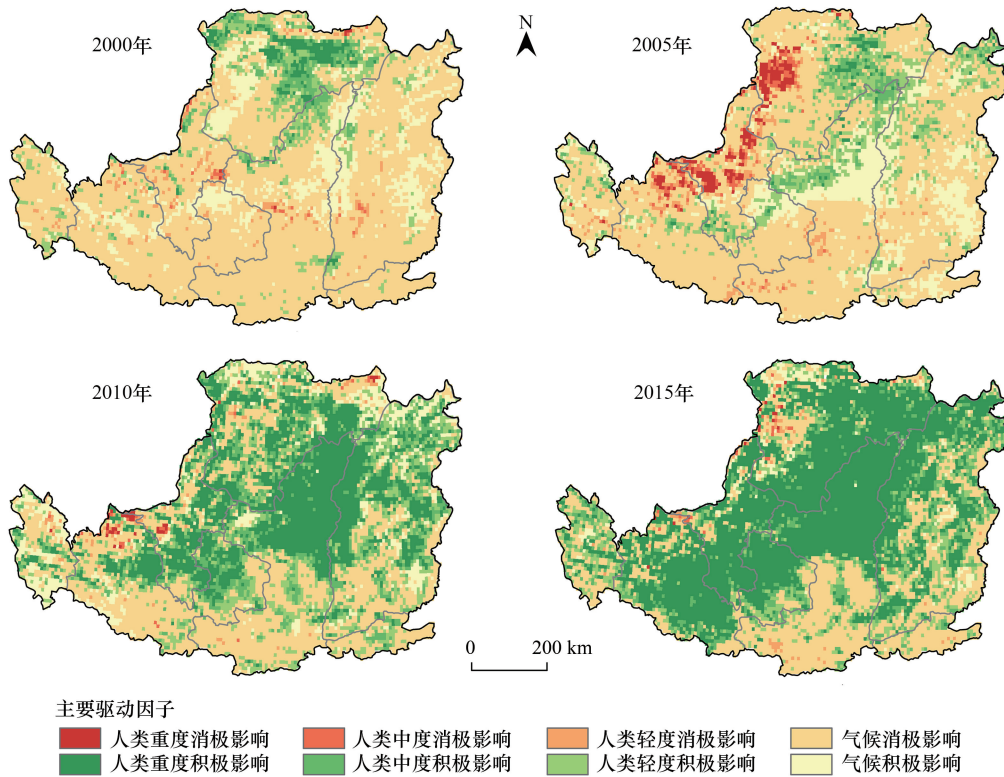


图 7 2000、2005、2010、2015 年生长季(5—10 月)植被覆盖度驱动因子空间分布

Fig.7 Spatial distribution of driving factors of vegetation cover in the growing season (May—October) of 2000, 2005, 2010 and 2015

3 讨论

本研究在考虑时滞效应的基础上,验证了退耕还林实施以前,植被覆盖度变化与气候变化之间显著相关,温度、降水和日照时数与植被覆盖度具有显著相关性的区域面积占比大于 80%。利用非线性随机森林算法

量化的植被覆盖度变化与气候变化关系具有较好的拟合效果。退耕还林工程开始实施以后,植被覆盖度的增加趋势更快。并对退耕还林工程实施前后,植被覆盖度变化进行归因分析,在退耕还林工程开始实施以后的2000—2015年生长季,人类活动对植被覆盖度变化的驱动面积呈现增长趋势,气候变化对植被覆盖度变化的驱动面积呈现降低趋势。本文提出的量化气候变化与人类活动对黄土高原植被覆盖度影响的方法不仅能够描述气候因子与人类活动之间复杂的非线性关系,而且能够一定程度上避免气候变化和人类活动的交互作用对归因分析的干扰,因此可以较为清晰地地区分影响黄土高原植被覆盖度变化的主要驱动因子。

1982—2015年黄土高原植被覆盖度呈“整体升高,局部退化”的趋势,且提升面积显著大于退化面积,本研究结果与前人研究结论一致^[41—42]。本研究对比1999年前后,植被覆盖度的显著增长区域扩张,表明“退耕还林”以来,植被覆盖度得到极大改善^[43—45]。温度、降水与日照时数与植被覆盖度变化在黄土高原的大部分区域呈显著正相关^[46]。除内蒙古东胜市西北部,其它大部分区域温度与植被覆盖度呈现显著正相关。温度的升高会引起植物生长期提前、生长季加速以及生长期延长,进而促进植被覆盖度的增长^[47—49]。降水在除了陕西南部、山西南部和河南的部分区域以外的其它大部分区域,都表现出与植被覆盖度变化显著的正相关关系。日照时数在陕西南部、山西和河南的部分区域以外的其它大部分区域,都表现出与植被覆盖度显著的正相关关系。一方面,温度、降水和日照时数的增长,促进了植被的光合作用^[50]。此外,温度与降水对植被覆盖度整体上均表现出显著的正相关,这与形成对植被生长有利的“暖湿化”气候有关^[51—52]。本研究结果显示,温度对植被覆盖度的促进效果要高于降水,之前研究也得出黄土高原植被覆盖度与温度有最大相关性^[53]。1982—1998年,内蒙古东胜市北部、山西中部、甘肃和宁夏以及陕西的部分区域的植被覆盖度均呈现减少趋势,这些区域的植被覆盖度主要与气候因素相关,表明气候因素在部分区域表现出负效应,这与温度升高促进地面水分蒸发,加剧土壤干化,从而影响植被的生长有关^[54—55]。降水导致云量增加,辐射减少,进而影响植被的光合作用,不利于植被生长^[56]。日照时数在温度和降水表现负相关的区域也呈现出负相关。当日照时数超过植被生长的需求限度会产生光抑制效应,从而抑制植被的生长^[57]。

总体上,2000—2015年生长季,人类活动对黄土高原植被覆盖度产生的积极影响面积和影响程度逐渐增加,气候变化对植被覆盖度的影响面积逐渐减少。在内蒙古东胜市西部、宁夏西部和甘肃平凉市周围的植被覆盖度发生显著减少的区域,主要的驱动因素是人类消极影响。一方面,快速的城市化进程导致这些区域许多耕地转变为建设用地,对植被生长产生负干扰^[58—59];另一方面,在实际生产中存在的不同程度“偷牧”现象对草地退化产生了一定的影响^[60]。在陕西南部和河南西北部以及山西的部分区域,主要驱动植被覆盖度减少的因素是气候因素。在这些区域,植被覆盖度与降水和日照时数呈现显著的负相关关系。在除上述以外的其它大部分区域,植被覆盖度变化呈现显著的增加趋势,植被覆盖度的驱动因子具有空间异质性。位于陕西北部的安塞县和吴旗县人类活动的积极影响最显著,植被覆盖度也表现出显著的增加趋势,这与该区属于退耕还林试点区,土地资源丰富,国家资助力度大有关^[61]。此外,农村劳动力在陕西省北部和青海省对植被覆盖度具有显著促进作用,粮食总产量的增加对西部甘肃、宁夏等省份植被恢复成效有促进作用^[62]。2000—2015年,气候变化对植被覆盖度的驱动面积占比由90.12%降低为34.67%,人类活动对植被覆盖度的积极驱动面积占比由8.68%增加为64.62%。表明“退耕还林”工程的实施改善了黄土高原的植被覆盖度^[43]。之前的研究也表明,近30年来,黄土高原植被覆盖度整体上呈现增加趋势,人类活动的贡献率逐渐增大^[63—64]。

本研究考虑了气候因素对植被覆盖度变化的时滞效应,利用一种新的思路量化气候变化与人类活动对植被覆盖度变化的影响。然而,随机森林算法对植被覆盖度和气候因子之间关系的拟合精度存在空间差异,在宁夏北部、内蒙古西临河市和包头市南部、山西的部分地区拟合精度较低,可能导致随机森林算法建立的模型弱化了这些区域植被覆盖度与气候因子之间的关系,从而影响归因分析中对主要驱动因子的划分。此外,本研究只基于气候因素和人类活动两个主要因素进行划分,没有将地形因素、土壤类型和植被类型等自然环境因子考虑在内,这需要在未来的研究中进一步探讨。本文研究发现2013年以后,人类活动对植被覆盖度的影响力度开始减少,气候变化对植被覆盖度的影响开始增加。这一趋势在未来是否会延续,以及造成这种趋势

的原因值得进一步研究和讨论。

4 结论

本研究考虑了气候因素对植被覆盖度变化的时滞效应,利用非线性随机森林算法拟合 1982—1998 年受人类活动影响较小时段的植被覆盖度变化与气候变化的关系,利用这一关系预测 1999—2015 年植被覆盖度变化与气候变化的关系,对植被覆盖度残差值设立阈值,超出阈值范围的残差值即为人类活动驱动的植被覆盖度变化值,进而量化气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖度变化的影响。结果表明:

(1)1982—2015 年黄土高原植被覆盖度呈现“整体增加,局部降低”的趋势,以 1999 年“退耕还林”为界限,“退耕还林”之后的植被覆盖度增长趋势要大于“退耕还林”之前的植被覆盖度增长趋势。

(2)1999 年以前,黄土高原大部分区域气候因素(温度、降水、日照时数)与植被覆盖度之间呈现显著正相关,温度相较于降水和日照时数对植被覆盖度的影响更大。随机森林算法能够较好的模拟植被覆盖度与气候因子之间的关系。

(3)1999 年以后,气候因子的主导作用逐渐降低,人类活动的积极效应逐渐增加,并且人类活动表现出更积极的趋势,人类消极作用发生的时间和区域具有不确定性。

参考文献(References):

- [1] Gao G Y, Fu B J, Wang S, Liang W, Jiang X H. Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework. *Science of the Total Environment*, 2016, 557/558: 331-342.
- [2] 贾路, 于坤霞, 徐国策, 任宗萍, 高海东, 李占斌, 李鹏. 基于耦合协调度的黄土高原地区 NDVI 与降水关系的变异诊断. *生态学报*, 2021, 41(18): 7357-7366.
- [3] 高海东, 李占斌, 李鹏, 贾莲莲, 徐国策, 任宗萍, 庞国伟, 赵宾华. 基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究. *地理学报*, 2015, 70(9): 1503-1515.
- [4] Fu B J, Hu C X, Chen L D, Honnay O, Gulinck H. Evaluating change in agricultural landscape pattern between 1980 and 2000 in the Loess hilly region of Ansai County, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114(2/3/4): 387-396.
- [5] Salim H A, Chen X L, Gong J Y. Analysis of Sudan vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1982—1993. *Asian Journal of Earth Sciences*, 2010, 3(1): 1-15.
- [6] 黄豪奔, 徐海量, 林涛, 夏国柱. 2001—2020 年新疆阿勒泰地区归一化植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2022, 42(7): 2798-2809.
- [7] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 287-293.
- [8] Gao P, Mu X M, Wang F, Li R. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(1): 1-10.
- [9] 任美镠. 黄河的输沙量: 过去、现在和将来——距今 15 万年以来的黄河泥沙收支表. *地球科学进展*, 2006, 21(6): 551-563.
- [10] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, Liu Z P. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4): 437-448.
- [11] Cao S X. Impact of China's large-scale ecological restoration program on the environment and society in arid and semiarid areas of China: achievements, problems, synthesis, and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(4): 317-335.
- [12] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [13] Griggs D J, Noguier M. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Weather*, 2002, 57(8): 267-269.
- [14] Wang J, Wang K L, Zhang M Y, Zhang C H. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly Southern China. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 451-461.
- [15] 孙晓鹏, 王天明, 寇晓军, 葛剑平. 黄土高原泾河流域长时间序列的归一化植被指数动态变化及其驱动因素分析. *植物生态学报*, 2012, 36(6): 511-521.
- [16] 魏建洲, 牛雪娜, 史战红, 王祥生, 张美玲. 黄土高原草地净初级生产力变化的驱动因素分析. *环境科学与技术*, 2022, 45(6): 203-211.
- [17] 李晴晴, 曹艳萍, 苗书玲. 黄河流域植被时空变化及其对气候要素的响应. *生态学报*, 2022, 42(10): 4041-4054.
- [18] 张翀, 任志远, 李小燕. 黄土高原植被对气温和降水的响应. *中国农业科学*, 2012, 45(20): 4205-4215.
- [19] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 114-115.
- [20] 陈玉兰, 焦菊英, 田红卫, 徐倩, 冯兰茜, 王楠, 白雷超, 杨雪. 黄土高原归一化植被指数与自然环境因子的空间关联性——基于地理探测器. *生态学报*, 2022, 42(9): 3569-3580.
- [21] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [22] 成佩昆, 胡守庚, 孙涛, 陈海滨. 陕西省退耕还林工程对植被恢复的效应——基于 PCSE 修正的面板数据模型. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1477-1486.

- [23] 吴晶晶, 焦亮, 张华, 杜达石, 朱许丽, 车曦晨. 生态修复前后祁连山地区植被覆盖变化. 生态学报, 2023, 43(1): 408-418.
- [24] 贺鹏, 毕如田, 徐立帅, 王婧姝, 曹晨斌. 基于地理探测的黄土高原植被生长对气候的响应. 应用生态学报, 2022, 33(2): 448-456.
- [25] Milich L, Weiss E. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: ground truth sampling of the Sahel along north-south transects. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(2): 235-260.
- [26] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 侯文娟. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [27] Shi S Y, Yu J J, Wang F, Wang P, Zhang Y C, Jin K. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over multiple time scales on the Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2021, 755(Pt 2): 142419.
- [28] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 田智慧. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应. 生态学报, 2022, 42(9): 3557-3568.
- [29] 余晨渝, 肖作林, 刘睿, 赵浣珂, 王科宇. 人类活动对西南山地植被覆盖变化的影响——以重庆市为例. 生态学报, 2022, 42(17): 7177-7186.
- [30] 李玉辰, 李宗省, 张小平, 杨安乐, 桂娟, 薛健. 祁连山国家公园植被时空变化及其对人类活动的响应. 生态学报, 2023, 43(1): 219-233.
- [31] Zheng K, Wei J Z, Pei J Y, Cheng H, Zhang X L, Huang F Q, Li F M, Ye J S. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 236-244.
- [32] 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成. 黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析. 环境科学, 2022, 43(9): 4902-4910.
- [33] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 260-270.
- [34] Delang C O, Yuan Z. China's Grain for Green Program: A Review of the Largest Ecological Restoration and Rural Development Program in the World. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [35] 刘洋洋, 王倩, 杨悦, 刚成诚, 章钊颖, 同琳静, 李建龙. 黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2309-2319.
- [36] Fu B J, Chen L D. Agricultural landscape spatial pattern analysis in the semi-arid hill area of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2000, 44(3): 291-303.
- [37] 杨正礼. 我国退耕还林研究进展与基本途径探讨. 林业科学研究, 2004, 17(4): 512-518.
- [38] 吴礼军, 刘青, 李臻, 赵莹, 赵铁珍. 全国退耕还林工程进展成效综述. 林业经济, 2009, 9: 21-37.
- [39] 苏冰倩, 王茵茵, 上官周平. 西北地区新一轮退耕还林还草规模分析. 水土保持研究, 2017, 24(4): 59-65.
- [40] 张雷, 王琳琳, 张旭东, 刘世荣, 孙鹏森, 王同立. 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用——以云南松分布模拟为例. 生态学报, 2014, 34(3): 650-659.
- [41] 王逸男, 孔祥兵, 赵春敬, 姚贵琦, 郭凯. 2000—2020 年黄土高原植被覆盖度时空格局变化分析. 水土保持学报, 2022, 36(3): 130-137.
- [42] 刘军会, 高吉喜, 王文杰. 青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系. 山地学报, 2013, 31(2): 234-242.
- [43] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 陈抒晨. 2000—2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因. 中国环境科学, 2016, 36(5): 1568-1578.
- [44] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 程圣东. 黄土高原植被恢复潜力研究. 地理学报, 2017, 72(5): 863-874.
- [45] 刘哲, 邱炳文, 王壮壮, 齐文. 2001—2014 年间黄土高原植被覆盖状态时空演变分析. 国土资源遥感, 2017, 29(1): 192-198.
- [46] Li P, Wang J, Liu M M, Xue Z H, Bagherzadeh A, Liu M Y. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015. *Catena*, 2021, 203(1): 105331.
- [47] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G, Nemani R R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [48] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 马文红. 近 20 年来中国植被活动在增强. 中国科学: C 辑, 2003, 33(6): 554-565, 578-579.
- [49] 孙艳玲, 郭鹏. 1982—2006 年华北植被覆盖变化及其与气候变化的关系. 生态环境学报, 2012, 21(1): 7-12.
- [50] 杨琪, 李书恒, 李家豪, 杜建峰, 王嘉川. 西安 4 种落叶乔木物候期对气候变化的响应. 生态学报, 2022, 42(4): 1462-1473.
- [51] 邸华, 贺晓香, 车宗彩. 祁连山区近 60 年气候变化对植被净第一性生产力的影响. 林业科技通讯, 2015, 6(6): 8-11.
- [52] 孙应龙, 李娜, 黄斌斌, 赵晓凤, 延昊, 曹云. 2000—2019 年黄土高原地区土壤保持时空变化及影响因素分析. 水土保持研究, 2022, 29(6): 290-297.
- [53] 孙倩倩, 刘超, 郑蓓君. 基于 ICEEMDAN 方法的黄土高原植被覆盖变化及其对气候变化的响应. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2129-2137.
- [54] 信忠保, 许炯心. 黄土高原地区植被覆盖时空演变对气候的响应. 自然科学进展, 2007, 17(6): 770-778.
- [55] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [56] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 常庆瑞. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素. 农业工程学报, 2014, 30(11): 244-253.
- [57] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被类型 NDVI 对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40(2): 678-691.
- [58] 黄悦悦, 杨东, 冯磊. 2000—2016 年宁夏植被覆盖度的时空变化及其驱动力. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2515-2523.
- [59] 刘旻霞, 赵瑞东, 邵鹏, 焦骄, 李俐蓉, 车应弟. 近 15 a 黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析. 干旱区地理, 2018, 41(1): 99-108.
- [60] 任小玢, 张东海, 俞鸿千, 徐洁, 蒋齐, 王占军, 吴旭东. 气候变化和人为活动在宁夏草地变化中的相对作用. 生态学报, 2022, 42(19): 7989-8001.
- [61] 任洪玉, 杨勤科, 张平仓. 黄土高原退耕还林试点地区现状调查与思考. 甘肃农业科技, 2004, 12(12): 3-5.
- [62] 李婷, 吕一河, 任艳皎, 李朋飞. 黄土高原植被恢复成效及影响因素. 生态学报, 2020, 40(23): 8593-8605.
- [63] 张芳宁, 杨亮洁, 杨永春. 1981—2016 年黄土高原植被 NDVI 变化及对气候和人类活动的响应. 水土保持研究, 2023, 30(2): 230-237.
- [64] 逯金鑫, 周荣磊, 刘洋洋, 温仲明, 王利成, 郭倩, 杨玉婷, 陈思慧. 黄土高原植被覆盖时空动态及其影响因素. 水土保持研究, 2023, 30(2): 211-219.