doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.03.021

基于 GEE 云平台的黄土高原生态修复区植被变化与归因

王　力[1]　赵思妍[1,2]　陈元鹏[3]　张阳坚[1,2]　周　泉[1,2]
(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035)

摘要: 植被为地球生态系统主要构成之一,也是人类社会经济活动的重要资源,监测植被动态变化有利于区域的环境保护及生态环境建设,基于谷歌云平台 GEE,集成了 Sen + MK 趋势分析、MK 突变分析、偏相关分析、多元回归残差以及相对贡献率分析等多种统计分析方法,构建了一套自动化植被恢复综合分析体系,可用于植被变化趋势检测及归因分析。在此基础上,区分人工修复和自然恢复对植被变化的影响,以陕西省黄土高原生态修复工程实施区域之一——铜川市耀州区为例,开展生态修复区与自然恢复区植被变化趋势及归因分析。分析结果表明:耀州区 1990—2020 年土地覆盖格局整体呈现自东南向西北耕地逐渐减少、林地草地逐渐增加的分布特征。植被覆盖变化特征呈现以速率 0.55%/a 波动上升的趋势,上升突变点为 2007 年。气候变化和人类活动对耀州区植被变化的相对贡献率具有一定的异质性,主要受到人类活动的正向驱动,相对贡献率为 79.10%,气候变化相对贡献率为 15.22%。在植被改善区域,应归因于以人类活动主导的生态修复工程,生态修复工程实施治理效果较好;在植被退化区域,主要为气候变化和人类活动的共同影响。

关键词: 生态修复; 自然恢复; 植被动态变化; 人类活动; 气候变化; 相对贡献率
中图分类号: K909; TP79　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2023)03-0210-14　　**OSID**:

Vegetation Change and Attribution in Ecological Restoration Area of Loess Plateau Based on GEE Cloud Platform

WANG Li[1]　ZHAO Siyan[1,2]　CHEN Yuanpeng[3]　ZHANG Yangjian[1,2]　ZHOU Quan[1,2]
(1. *Aerospace Information Research Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101, *China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*
3. *Land Consolidation and Rehabilitation Center*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100035, *China*)

Abstract: Vegetation is one of the main components of the earth's ecosystem and an important resource for human social and economic activities. Monitoring the dynamic change of vegetation is conducive to regional environmental protection and ecological environment construction. Based on GEE, multiple statistical analysis methods such as Sen + MK trend analysis, MK mutation analysis, partial correlation analysis, multiple regression residual and relative contribution rate analysis were integrated, and an automated comprehensive analysis system of vegetation restoration was constructed, which can be used for vegetation change trend detection and attribution analysis. On this basis, taking Yaozhou District, Tongchuan City, one of the implementation areas of ecological restoration project on the Loess Plateau in Shaanxi Province as an example, the impact of artificial restoration and natural restoration on vegetation change was distinguished to carry out vegetation change trend and attribution analysis in ecological restoration and natural restoration areas. The analysis results showed that from 1990 to 2020, the overall land cover pattern in Yaozhou District showed the distribution characteristics of gradual decrease of cultivated land and gradual increase of forest land and grassland from southeast to northwest. The change characteristics of vegetation cover was fluctuated and increased at the rate of 0.55%/a, and the sudden change point was appeared about in 2007. The growth rate of NDVI in ecological restoration project area

收稿日期: 2022-05-12　修回日期: 2022-08-11
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0117900)和国家自然科学基金面上项目(41871347)
作者简介: 王力(1981—),男,研究员,博士,主要从事碳循环遥感和生态修复研究,E-mail: wangli@aircas.ac.cn
通信作者: 陈元鹏(1988—),男,高级工程师,博士,主要从事国土空间生态保护修复遥感监测技术研究,E-mail: cyp520918@163.com

was slightly higher than that in natural regeneration area. The relative contribution rate of climate change and human activities to vegetation change in Yaozhou District was heterogeneous, which was mainly driven by human activities. The relative contribution rate of human activities was 79.10%, and the relative contribution rate of climate change was 15.22%. In the vegetation improvement area, it should be attributed to the ecological restoration project dominated by human activities, and the implementation effect of ecological restoration project was good. In the area of vegetation degradation, it was mainly the joint impact of climate change and human activities.

Key words: ecological restoration; natural regeneration; vegetation dynamic change; human activity; climate change; relative contribution rate

0　引言

植被是地球生态系统主要构成之一[1]，其生长可以反映生态系统的综合变化[2]，可以有效缓解水土流失、维持生态平衡[3]。归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)是量化植被生长状态的重要参数，谷歌云平台(Google Earth Engine, GEE)可以对大量全球尺度地球科学资料进行在线可视化计算和分析处理，二者结合用于监测大规模、长时序植被动态变化，进而为地区环境治理和生态工程提供有效参考[4]。陕西省黄土高原生态环境脆弱，水土流失严重，且该地废弃矿山较多，需要进行生态保护和恢复。虽然从 1999 年以来，陕西省黄土高原的生态环境得益于生态恢复工程，但其生态环境总体上较为脆弱，植被恢复需要较长的时间[5]。我国自 2016 年以来，共批复 35 个山水林田湖草试点工程[6]，这些工程的实施已获得生态、社会和经济等效益，但还存在成效监测评价不充分的问题。本文基于试点工程的开展实施，并利用遥感技术来探讨生态修复工程成效。

近年来，诸多学者开展黄土高原植被变化的驱动机制研究[7]，但对生态工程修复区和自然恢复区域进行识别与提取，并对其植被动态变化和主导驱动力进行定量对比分析研究较少。以往的研究主要针对不同植被、气候区域来开展植被覆盖对气候和人类活动的响应[8-11]，其中，气候变化和人类活动影响占主导，降水和气温是近年来众多学者研究中选择的气候变化关键因子，与植被在空间上具有高度的异质性[12]。人类活动对植被变化影响体现在两方面：①通过实施退耕还林、封山还草等生态工程，促进植被的生长[13-14]。②因为城市化、人类生产生活等导致生态原有平衡受到破坏，妨碍植被的生长[15-16]。目前定量研究植被变化驱动力影响是全球变化研究中关注的重点，相比于过去仅依靠定性分析气候和人类对于植被变化的影响更具有说服力[17]，其中以残差分析法为主[18]，人类活动的贡献率可以用残差法进一步量化[19]。例如，于璐等[20]通过残差法剔除气候因素后定量分析人类活动贡献率，该方法说服力较强，是目前分离气候变化和人类活动应用最广泛的模型，适合长时序分析。因此，本研究采用上述残差法在植被驱动力研究中分析气候和人类活动对生态修复与自然恢复区域植被变化的影响。

综上，本研究以陕西省黄土高原生态修复工程实施区域之一——铜川市耀州区为例，基于 GEE 云平台，集成多种变化分析及归因分析算法，构建一套自动化植被恢复综合分析体系，用于植被变化趋势检测及归因分析，以期更加全面地揭示耀州区植被、气候和人类活动之间的相互影响机制，为评价生态修复工程的实施效果及制定生态环境系统恢复建设措施提供科学依据[21]。

1　研究方法与数据预处理

1.1　研究方法

本研究率先区分人工修复和自然恢复对植被变化的影响，以陕西省黄土高原生态修复工程实施区域之一——铜川市耀州区为例，开展区域生态本底调查，并探究长时序植被动态变化空间分布和变化趋势；在气候暖干化和实施大规模植被恢复措施的背景下，以气候的时空动态变化为切入点，深入研究生态修复和自然恢复下植被动态变化与气候因素的响应关系；通过收集和整理研究区的生态修复工程实施情况，结合地面调查结果，定量分析气候变化和人类活动对植被变化的贡献率，以探究植被恢复演变特征与生态工程实施的一致性效果，并比较各生态修复区植被恢复与退化情况(图 1)。

1.2　研究区概况

研究区位于铜川市耀州区(34°91′N，108°98′E)，总面积 1 617 km^2；属于半干旱、半湿润、易旱区，年均降水量 554.5 mm，年均气温 8.4 ~ 12.3℃。该区属于黄土高原沟壑区，广阔平坦，沟壑深切，台垛、沟壑交错分布，是黄土高原沟壑区的典型代表，亦是黄土高原地区农耕作区典型代表。其中主要有 3 个农业区：北部山地峡谷区以多种经营

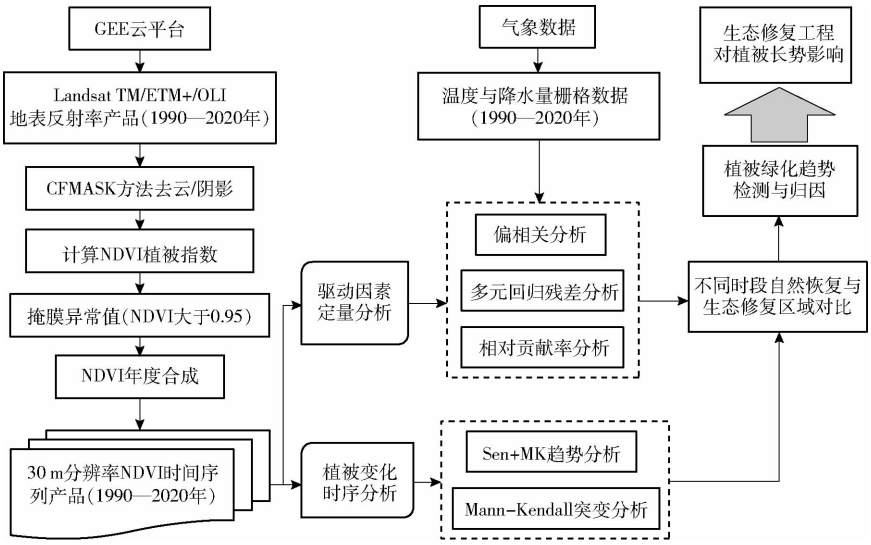


图 1 1990—2020 年典型生态修复工程区植被变化趋势与归因分析工作流程

Fig. 1 Workflow of vegetation change trend and attribution analysis in typical ecological restoration project area from 1990 to 2020

和林牧业为主;中部梁卯丘陵区农林牧全面发展;南部台原川道区,是商品粮、蔬菜和外贸农产品的主要基地[22]。

根据陕西省黄土高原生态保护修复实施方案中工程部署范围,利用谷歌地球软件 Google Earth Pro 和高分系列数据对生态修复工程区和自然恢复区进行识别与提取,确定耀州区生态修复工程区部署范围(图 2)。其中主要包括 4 个生态修复工程部署区:沮河上游黄土丘陵沟壑区、赵氏河流域黄土台塬沟壑区、漆沮河下游河谷川道区和漆水河两岸黄土台塬沟壑区;由于耀州区内非项目区域以林地为主,受人为干扰较少,主要依靠生态系统的自我调节能力。工程区主要建设内容有水土流失治理、废弃矿山整治等(表 1),因此本研究将耀州区内非项目区域视为自然恢复区。

1.3 数据预处理

1.3.1 长时序遥感数据收集与处理

利用 GEE 云平台及大数据处理方法,收集 1990—2020 年耀州区历史长时间序列的 Landsat 遥感数据,构建研究区 30 m 空间分辨率长时序遥感数据 NDVI 数据集,有效避免了时间和空间对地学研究的限制。由于年度 95 分位数 NDVI 数据稳定性高,可在一定程度上减少年内影像获取数量少所带来的不确定性。因此本文基于 GEE 云平台采用 95 分位数合成的方法合成年度 NDVI 特征数据集。

本次生态修复区监测采用 GEE 云平台提供的 USGS Landsat 5 Surface Reflectance Tier 1、USGS Landsat 7 Surface Reflectance Tier 1、USGS Landsat 8 Surface Reflectance Tier 1 地表反射率产品数据集作为植被恢复监测的基础数据集(表 2),该产品是对

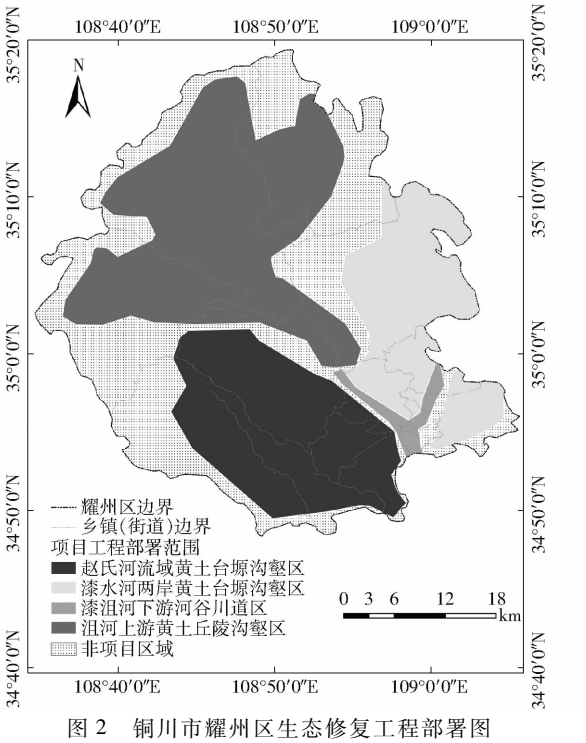


图 2 铜川市耀州区生态修复工程部署图

Fig. 2 Deployment of ecological restoration project in Yaozhou District, Tongchuan City

Landsat 4、5、7、8/ETM 传感器所采集的原始数据,利用 LEDAPS 系统进行大气辐射校正,并采用 CFMASK 算法对云、云影像、水、雪进行了检测。然后,同样基于 GEE 云平台,对研究时段中每一年收集的所有 Landsat 影像 NDVI 进行逐像素年度 95 分位数合成。

1.3.2 土地覆盖类型数据

土地覆盖/利用数据集包括 2000、2010、2020 年 3 期数据,空间分辨率为 30 m,坐标系为 WGS-1984 坐标系,数据源为中国研制的空间分辨率 30 m 全球

表 1　耀州区生态保护修复工程项目建设

Tab. 1　Construction of ecological protection and restoration project in Yaozhou District

项目名称	建设主要内容	建设期限
沮河上游流域生态保护修复项目(一期)	水土流失治理、河道综合整治、水源地保护、废弃矿山综合整治 4 处、农村面源污染整治、废弃建筑物拆除	2017 年 3 月—2018 年 6 月
耀州区一二三道沟废弃矿山综合整治及区域生态修复项目	废弃矿山综合整治 2 处	2017 年 3 月—2018 年 6 月
赵氏河流域生态保护修复项目(一期)	水土流失治理、河道综合整治、水源地保护	2017 年 3—12 月
浊峪河流域生态保护修复项目	水土流失治理、河道综合整治、水源地保护、农田生态功能提升 4 416. 67 hm^2	2017 年 3—12 月
沮河上游流域生态保护修复项目(二期)	水土流失治理、河道综合整治、水源地保护、农田生态功能提升 66. 67 hm^2、废弃矿山综合整治 4 处	2018 年 1—12 月
耀州区关庄等 4 镇农田生态功能提升项目	农田生态功能提升 566. 67 hm^2	2019 年 3—12 月

表 2　GEE 云平台上的 Landsat 地表反射率数据集

Tab. 2　Landsat surface reflectance data sets on GEE platform

传感器	数据类型	图像采集 ID	选用时间段
TM	USGS Landsat 5 Surface Reflectance	LANDSAT/LT05/C01/T1_SR	1987—2011 年
ETM +	USGS Landsat 7 Surface Reflectance	LANDSAT/LE07/C01/T1_SR	1999—2018 年
OLI	USGS Landsat 8 Surface Reflectance	LANDSAT/LC08/C01/T1_SR	2013—2020 年

地表覆盖数据 GlobeLand30 数据集(http://www.globallandcover.com/)。其中,土地利用/覆盖类型包括耕地、林地、草地、湿地、建设用地和未利用地等 10 个一级类型,根据研究区实际情况及本研究需要,将土地类型数据重分类为耕地、林地、草地、水体、人造地表。

1.3.3　气象数据

利用 GEE 云平台的 ECMWF climate reanalysis 数据集(分辨率 11 132 m)收集了研究区 1990—2020 年的逐年气象数据(年均气温和年总降水量),得到 31 年间的年平均气温和年平均降水量栅格数据。

2　土地覆盖类型时空变化特征

2.1　时间变化特征

耀州区 2000—2020 年土地覆盖类型为林地、耕地、草地、水体和人造地表,覆盖面积由大到小依次为林地、耕地、草地、水体、人造地表,如表 3 所示。2000—2020 年,水体和人造地表面积均有所增加,其中人造地表增长幅度最大,耕地和草地呈现出轻微减少的趋势,林地面积基本保持不变(图 3)。

表 3　不同时期耀州区土地覆盖面积

Tab. 3　Land cover area of Yaozhou District in different periods　　km^2

年份	耕地	林地	草地	水体	人造地表
2000	669. 20	780. 35	126. 91	102. 85	32. 09
2010	640. 17	778. 73	126. 15	97. 76	64. 57
2020	639. 10	776. 34	114. 97	122. 84	78. 18

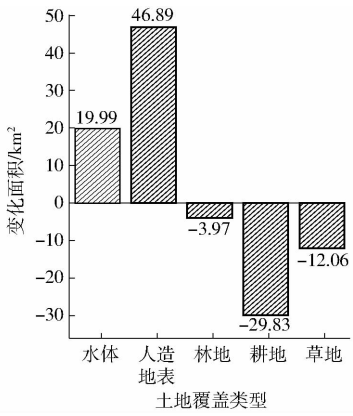


图 3　2000—2020 年耀州区土地覆盖类型总变化面积

Fig. 3　Total change area of land cover types in Yaozhou District from 2000 to 2020

2.2　空间变化特征

耀州区土地覆盖格局整体呈现自东南向西北耕地逐渐减少、林地草地逐渐增加的分布特征(图 4),其中人造地表在研究区东南部分布较为集中密集,在西北部为零星状分布。其中,生态修复工程区以耕地和林地为主要土地覆盖类型,且呈稳定不变的态势,自然恢复区以林地为主要土地覆盖类型,水体和人造地表占比较少,但总体呈增加趋势。

3　植被变化趋势分析

3.1　动态变化分析方法

3.1.1　Sen + MK 趋势分析

Theil − Sen Median(TSM)趋势分析[23]和 Mann − Kendall 非参数检验法[24]常用来分析 NDVI 空间演

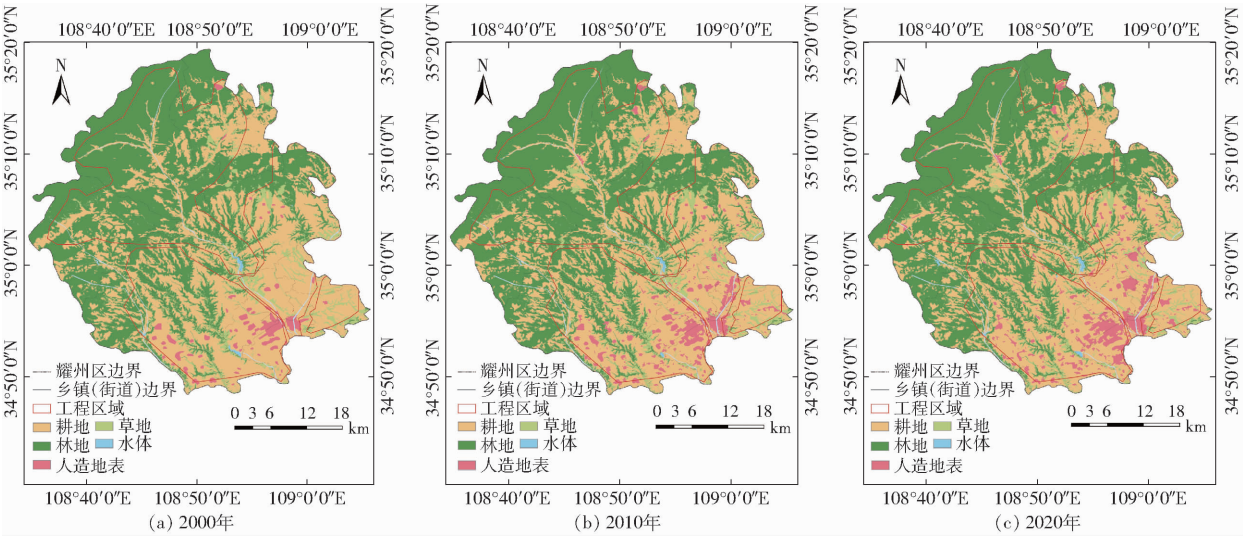


图 4 耀州区不同时期土地覆盖分类图

Fig. 4 Land cover classification maps of different periods in Yaozhou District

变特征[25]。本文采用 Theil－Sen Median 趋势分析方法并结合 MK 检验方法判断 Sen 趋势的显著性，与一元线性回归趋势分析方法相比，其可以规避时间序列数据分布和数据缺失对分析结果的影响[26]，同时可以降低异常值对结果的影响[27]。TSM 计算公式为

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{NDVI_j - NDVI_i}{j-i}\right) \quad (1<i<j<n) \tag{1}$$

式中 $NDVI_i$、$NDVI_j$——第 i、j 时间序列的 NDVI

n——时间序列的长度

MK 是一种非参数统计检验方法，用来判断趋势的显著性，其计算公式为

$$Z_c = \begin{cases} \dfrac{\tau-1}{\sqrt{\text{Var}(\tau)}} & (\tau>0) \\ 0 & (\tau=0) \\ \dfrac{\tau+1}{\sqrt{\text{Var}(\tau)}} & (\tau<0) \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$\tau = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\text{sign}(NDVI_j - NDVI_i) \tag{3}$$

$$\text{sign}(NDVI_j - NDVI_i) = \begin{cases} 1 & (NDVI_j - NDVI_i>0) \\ 0 & (NDVI_j - NDVI_i=0) \\ -1 & (NDVI_j - NDVI_i<0) \end{cases} \tag{4}$$

$$\text{Var}(\tau) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{5}$$

本文使用显著性水平 $\alpha=0.05$，对应的 $u_{1-\alpha/2}$ 为 1.96[27-28]。

3.1.2 Mann－Kendall 突变分析

Mann－Kendall 突变分析主要检验变化要素从一个相对稳定状态变化到另一个状态的变化。本文利用该方法分析 NDVI 时间序列在各时间节点的变化情况。突变检验方法如下[25,29]：

对于具有 m 个样本量的时间序列 $\{x_t\}$，观察值序列 $\{x_t, t=1,2,\cdots,m\}$。构造一个序列 S_k 为

$$S_k = \sum_{i=1}^{k} r_i \quad (k=2,3,\cdots,m) \tag{6}$$

其中

$$r_i = \begin{cases} 1 & (x_i>x_j) \\ 0 & (x_i\leqslant x_j) \end{cases} \quad (1<i<j<n) \tag{7}$$

式中 x_i、x_j——第 i、j 年的 NDVI

在原序列随机独立等假设下，S_k 的均值和方差分别为

$$\begin{cases} E(S_k) = \dfrac{n(n-1)}{4} \\ \text{Var}(S_k) = \dfrac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \tag{8}$$

将 S_k 标准化得

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k=1,2,\cdots,n) \tag{9}$$

UF_k 组成一条 UF 曲线，通过信度检验可得出其是否有明显的变化趋势。将此方法引用到反序列中，计算得到另一条曲线 UB，则两条曲线在置信区间内的交点确定为突变点。给定显著性水平 $\alpha=0.05$，则统计量 UF 和 UB 的临界值为 ±1.96。UF 大于 0，表示序列呈上升趋势；反之，表明呈下降趋势，大于或小于 ±1.96，表示上升或下降趋势明显。

3.1.3 植被覆盖分级规则

参考陈鹏[30]、张艺成等[31]对植被覆盖的分级标准并结合研究区 NDVI 分布特征，划分了研究区植被覆盖 5 个等级（表 4）。

3.2 植被时间变化特征

3.2.1 年际变化趋势

耀州区 1990—2020 年 NDVI 平均值为 0.66，呈

表 4　植被覆盖分级

Tab. 4　Vegetation cover classification

归一化植被指数	等级	像元数	占总面积比例/%
[0,0.1)	极低植被覆盖区	402	0.02
[0.1,0.3)	低植被覆盖区	19 514	0.89
[0.3,0.5)	中等植被覆盖区	227 208	10.34
[0.5,0.7)	中高植被覆盖区	988 206	44.98
≥0.7	高植被覆盖区	961 621	43.77

现以速率 0.55%/a 波动上升的趋势(图 5)。其中 1990—2000 年增速为 0.61%/a，研究区 1994—1995 年期间植被覆盖程度出现了明显下降趋势，主要是由于该年份遭受罕见的特大干旱。由于陕西省自 1999 年加快开展退耕还林、还草，生态环境状况总体有所改善，植被覆盖程度增加。

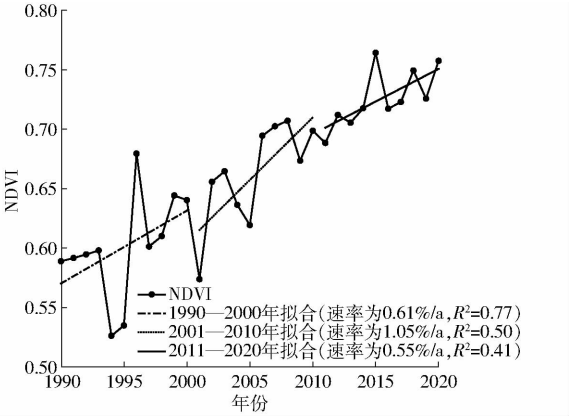


图 5　1990—2020 年 NDVI 随时间变化曲线

Fig. 5　NDVI time change curves from 1990 to 2020

耀州区工程区与非工程区的平均 NDVI 变化曲线如图 6 所示。2000—2020 年期间，工程区 NDVI 呈现明显的上升趋势，可见生态修复区治理效果明显，其中沮河上游工程区 NDVI 最高且持平稳上升趋势，该区域水土流失治理效果较好，自然恢复区也呈现明显上升，但相对来说较为平缓，对比可知人工治理的生态修复速度稍高于自然生态的恢复速度。

3.2.2　时间突变特征

对耀州区 1990—2020 年年均 NDVI 进行 MK 突变检验(图 7)，依据曲线交点位置确定耀州区 NDVI 上升的突变年份发生在 2007 年，这与 1999 年退耕还林工程对植被的恢复作用密不可分，但是 NDVI 序列突变趋势不够显著。在 2017—2020 年期间植被覆盖呈增长趋势，但是其上升趋势不够显著，可能因为生态修复工程实施后植被的生长及矿区的恢复需要一定的时间，因此效果不够明显。

3.3　植被空间变化特征

3.3.1　空间分布特征

研究区 1990—2020 年年均 NDVI 显示(图 8)，耀州区植被覆盖格局呈现自西北向东南由高到低的

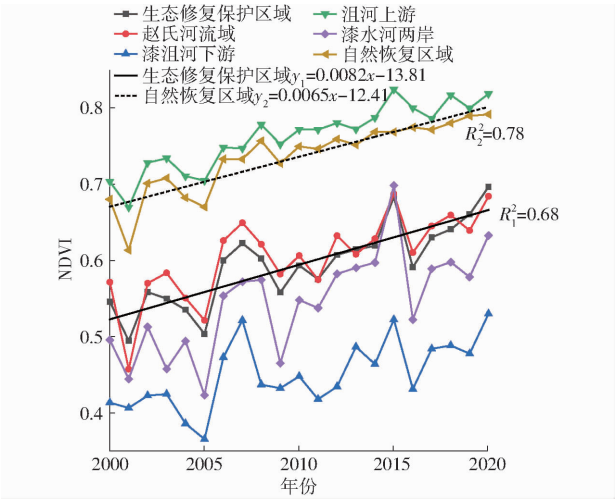


图 6　耀州区工程区与非工程区 NDVI 变化曲线

Fig. 6　Curves of NDVI change between engineering area and non engineering area in Yaozhou District

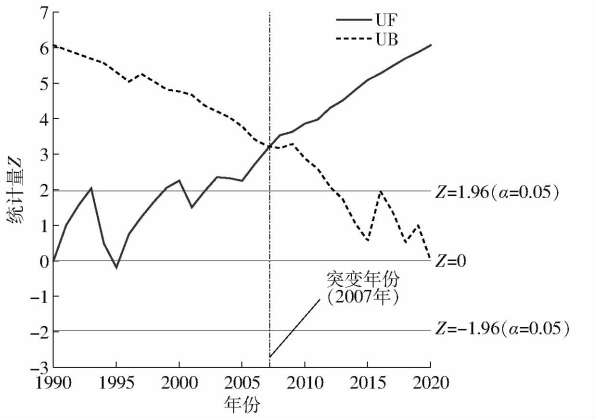


图 7　耀州区植被覆盖时间突变特征

Fig. 7　Time mutation characteristics of vegetation cover in Yaozhou District

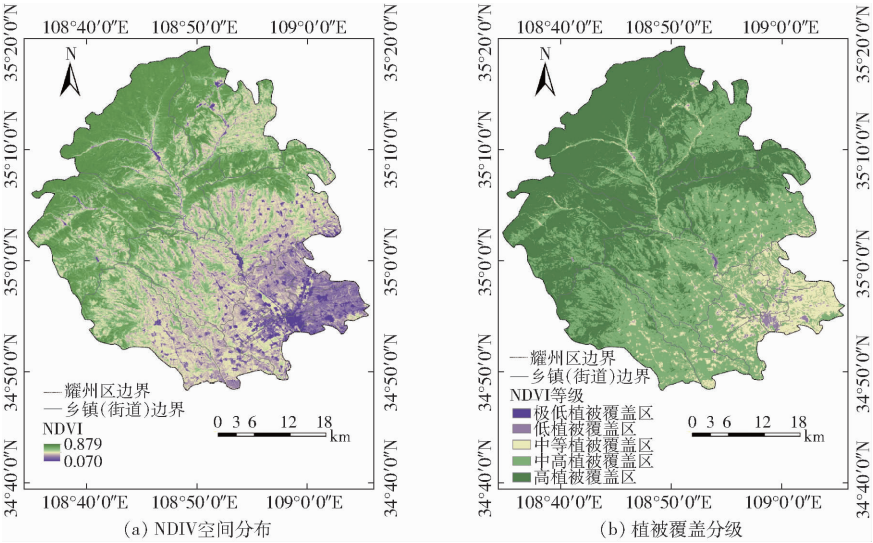
分布特征，植被覆盖整体较好。其中耀州区中高和高植被覆盖区面积占 88.75%，主要分布于北部和西部山地峡谷区及中部梁卯丘陵区；中等植被覆盖区面积占 10.34%，植被类型多为草地和耕地为主，植被较为稀疏；低和极低植被覆盖区面积占 0.91%，主要分布于研究区水库及建设用地区域。

3.3.2　变化趋势的空间特征

利用 TSM 趋势分析，并结合 Mann－Kendall 非参数检验法，在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下，将植被覆盖变化结果划分为明显改善、轻微改善、稳定不变、轻微退化和严重退化 5 个等级。

从 NDVI 斜率变化分布图和变化类型图来看(图 9、10)，耀州区 1990—2020 年东北、中部和西南部 NDVI 增速最为明显，主要分布于赵氏河流域黄土台塬沟壑区和沮河上游黄土丘陵沟壑区生态修复工程区。2010—2020 年 NDVI 整体增速最大，1990—2000 年整体增速最小。

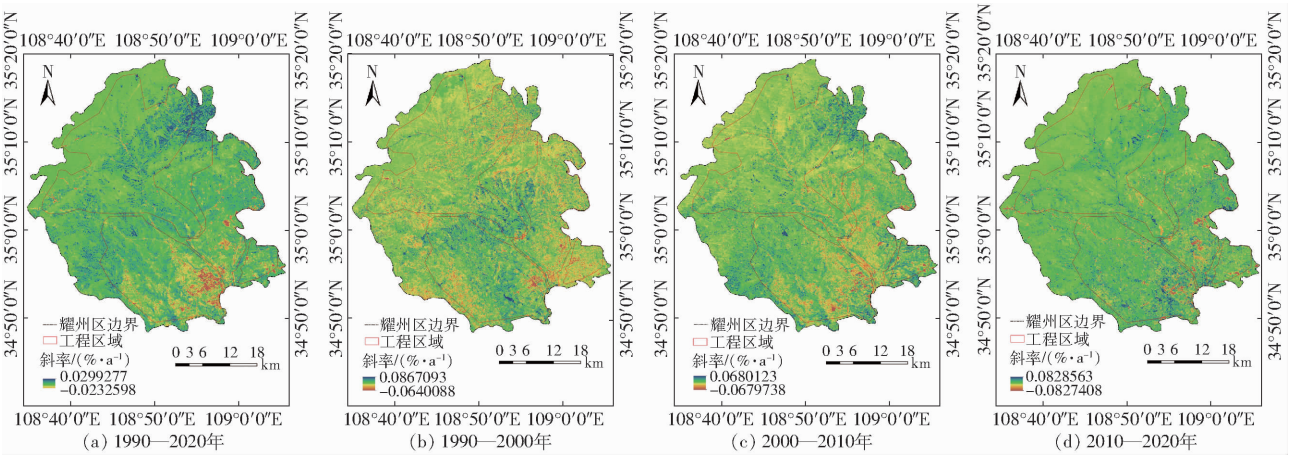
从表 5 来看，1990—2000 年呈现增加和减少趋



(a) NDIV空间分布 (b) 植被覆盖分级

图 8 1990—2020 年 NDVI 空间分布特征

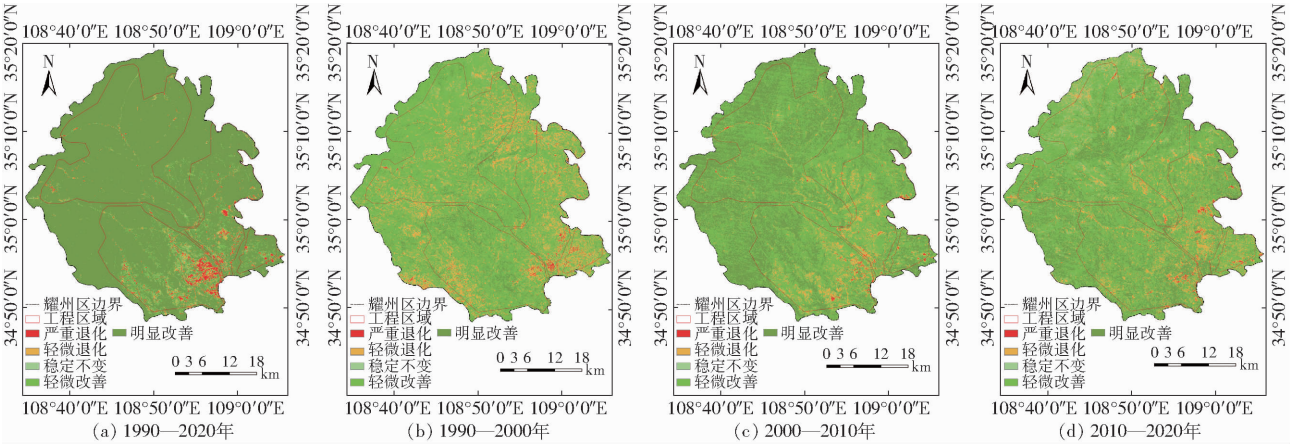
Fig. 8 Spatial distribution characteristics of NDVI from 1990 to 2020



(a) 1990—2020年 (b) 1990—2000年 (c) 2000—2010年 (d) 2010—2020年

图 9 1990—2020 年 NDVI 变化趋势

Fig. 9 1990—2020 年 NDVI trend



(a) 1990—2020年 (b) 1990—2000年 (c) 2000—2010年 (d) 2010—2020年

图 10 1990—2020 年 NDVI 变化类型

Fig. 10 Types of NDVI changes from 1990 to 2020

势的面积分别为 78.47% 和 17.2%，其中植被覆盖明显改善的面积达 10.82%，轻微改善的面积达 67.65%，严重退化占比很小，为 0.84%，稳定不变占比 4.33%，这与国家 1999 年开始实施植树造林、退耕还林等工程有关；2000—2010 年，相较于 2000 年之前呈现上升趋势的面积增加幅度较大，呈现下降趋势的面积有所减少，分别为 91.04% 和 7.33%，植被覆盖明显改善的面积大幅度增加；2010—2020 年整体 NDVI 变化较为稳定，虽较 2010 年之前退化区域有所增加，但主要分布于建设用地较为集中

区域。

表 5　耀州区不同时期植被变化类型像元个数及比例

Tab. 5　Pixel number and proportion of different periods vegetation change types in Yaozhou District

变化类型	1990—2000 年		2000—2010 年		2010—2020 年	
	像元个数	百分比/%	像元个数	百分比/%	像元个数	百分比/%
明显改善	237 710	10. 82	867 209	39. 47	559 051	25. 45
轻微改善	1 486 298	67. 65	1 132 928	51. 57	1 274 199	58. 00
稳定不变	95 070	4. 33	35 764	1. 63	120 700	5. 49
轻微退化	359 320	16. 36	150 355	6. 84	227 527	10. 36
严重退化	18 534	0. 84	10 690	0. 49	15 453	0. 70

通过比较分析生态修复工程区与自然恢复区植被变化趋势(表 6),发现在 1990—2020 年植被变化趋势并无显著差异,且自然恢复区的植被变化趋势值更大;而在 2017—2020 年整体增长速率较快,且生态修复工程区域的植被增长速率普遍高于自然恢复区,表明该工程项目对于提升植被覆盖有促进作用,由于 5 年植被生长时间较短,在 2017—2020 年期间植被覆盖变化程度不够显著。

表 6　不同区域 NDVI 斜率和变化程度平均值

Tab. 6　Average NDVI slopes and change types in different regions

区域		1990—2020 年		2017—2020 年	
		斜率/(%·a^{-1})	变化程度	斜率/(%·a^{-1})	变化程度
生态修复工程区	整体区域	0. 005 4	1. 550 2	0. 010 2	0. 390 4
	赵氏河流域	0. 005 1	1. 383 6	0. 009 6	0. 348 3
	漆沮河下游	0. 004 0	1. 110 9	0. 013 2	0. 373 3
	沮河上游	0. 006 3	1. 930 3	0. 007 8	0. 510 0
	漆水河两岸	0. 006 1	1. 776 0	0. 010 2	0. 329 9
自然恢复区		0. 006 5	1. 917 2	0. 008 5	0. 382 6

注:变化程度即,0 表示植被无变化,0 ~ 1 表示植被轻微改善,1 ~ 2 表示植被明显改善。

4　植被变化归因分析

4.1　归因分析方法

4.1.1　偏相关分析

降水量和温度被认为是直接影响植被生长的主要气候变量,通过文献分析,这两个因素之间存在一定的线性相关性[32],本文应用偏相关分析评估气候因素与 NDVI 变化的关系,计算公式为

$$r_{xyz} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \tag{10}$$

式中　r_{xyz}——x 和 y 的偏相关系数

r_{xy}、r_{xz}、r_{yz}——x 和 y、x 和 z、y 和 z 的简单相关系数

采用 t 检验方法,逐像素进行统计分析,并以 0. 05 的显著性水平进行检验。根据检验结果,将偏相关性分为 5 个等级:显著正相关($r_{xyz} > 0, p < 0.05$),显著负相关($r_{xyz} < 0, p < 0.05$),不显著正相关($r_{xyz} > 0, p \geq 0.05$),不显著负相关($r_{xyz} < 0, p \geq 0.05$),无线性相关关系($r_{xyz} = 0$)[33]。

4.1.2　多元回归残差分析

残差分析法是建立气候因子与 NDVI 的回归模型,分离出气候对植被生长的响应部分[33-35]。该方法通过回归模型得到 NDVI 预测值,进而得到真实值与预测值之间的残差(被解释为人类活动对植被生长的影响)[36]。为了更好地反映生态工程对于植被变化的影响,本文在生态工程实施前(1990—1999 年)建立 NDVI 与气候因子间的多元回归模型,即像元尺度上计算 NDVI -气候响应模型[34]。基于 1990—1999 年的 NDVI -气候响应模型的计算公式为

$$NDVI = aT + bP + c \tag{11}$$

式中　T——年平均温度

P——年平均总降水量

a、b——NDVI 与 T、P 的回归系数

c——常数

基于建立的回归方程,逐像元计算 2000—2020 年 NDVI 预测值(仅受气候变化驱动),然后,将 NDVI 观测值减去基于气候变化的 NDVI 预测值,得到 2000—2020 年 NDVI 残差时间序列。残差序列的计算公式为

$$\varepsilon = NDVI_{obs} - NDVI_{pre} \tag{12}$$

式中　ε——NDVI 残差

$NDVI_{obs}$——NDVI 观测值

$NDVI_{pre}$——NDVI 预测值

4.1.3　相对贡献率分析

大区域尺度上植被变化的驱动因素识别与量化,一直是国内外相关研究的难点和关注的核心问题。在多元回归残差分析的基础上,本研究采用一种植被变化的贡献率计算方法[37-38],在像元尺度上区分植被变化的主要驱动因素,并定量计算气候变化和人类活动对植被变化的相对贡献率,如表 7 所示。

4.2　植被变化对气候的响应

从图 11 和表 8 可以看出,1990—2020 年耀州区 NDVI 与温度的偏相关系数 R 均值为 -0. 12,整体呈现负相关性,且研究区整体植被恢复与气温的相关性相较于降水量较弱。其中,自然恢复区相关性最高,显著负相关占该区域 68. 240 6%;沮河上游工程区相关性次之,显著负相关占区域 64. 986 6%;漆水河两岸工程区相关性最低,显著负相关占该区

表 7 植被变化的驱动因素判定标准和贡献率计算方法

Tab. 7 Criteria for determining driving factors and calculation method of contribution rate of vegetation change

NDVI 观测值变化趋势值	驱动因素	驱动因素划分标准		驱动因素贡献率/%	
		NDVI 预测值变化趋势值	NDVI 残差变化趋势值	气候变化	人类活动
>0	CC + HA	>0	>0	$\frac{Slope(NDVI_{pre})}{Slope(NDVI_{obs})}\times100\%$	$\frac{Slope(NDVI_{res})}{Slope(NDVI_{obs})}\times100\%$
	CC	>0	<0	100	0
	HA	<0	>0	0	100
<0	CC + HA	<0	<0	$\frac{Slope(NDVI_{pre})}{Slope(NDVI_{obs})}\times100\%$	$\frac{Slope(NDVI_{res})}{Slope(NDVI_{obs})}\times100\%$
	CC	<0	>0	100	0
	HA	>0	<0	0	100

注：$Slope(NDVI_{obs})$、$Slope(NDVI_{pre})$和$Slope(NDVI_{res})$分别为像元尺度上，2000—2020 年基于遥感观测数据的 NDVI 实测值时间序列的变化趋势值、基于多元回归分析的 NDVI 预测值时间序列的变化趋势值以及基于残差分析的 NDVI 残差时间序列的变化趋势值。其中，$Slope(NDVI_{pre})$和$Slope(NDVI_{res})$分别用于反映仅受气候变化和仅受人类活动驱动的植被变化趋势值；CC 表示气候变化(Climate change)，HA 表示人类活动(Human activity)。

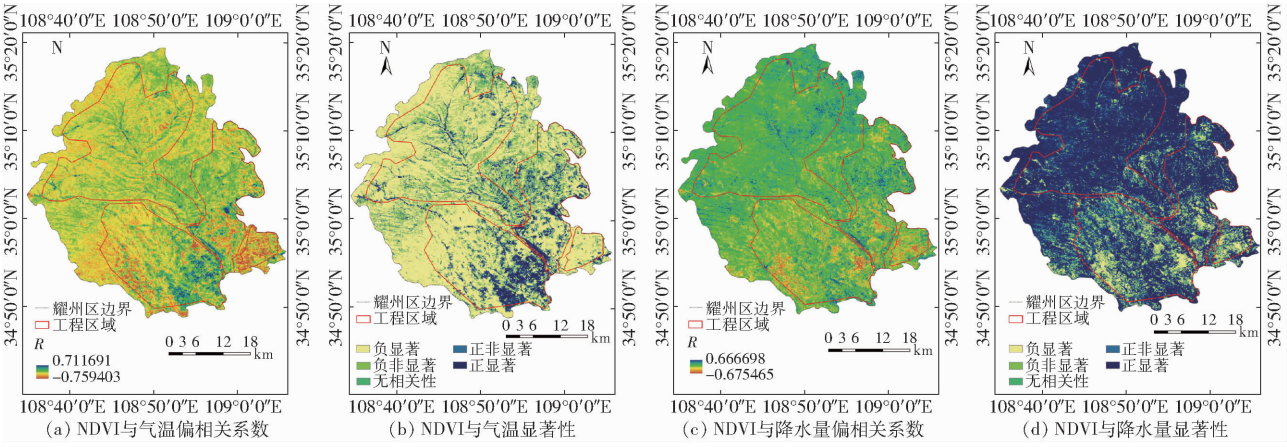


图 11 1990—2020 年耀州区 NDVI 与气候因子偏相关系数及显著性空间分布

Fig. 11 Partial correlation coefficient and significance spatial distribution between NDVI and climate factors in Yaozhou District from 1990 to 2020

表 8 生态修复与自然恢复区域植被变化与气候因子的关系

Tab. 8 Relationship between vegetation change and climate factors in artificial restoration and natural restoration areas

区域		降水量			气温		
		R	显著正相关比例/%	显著负相关比例/%	R	显著正相关比例/%	显著负相关比例/%
生态修复工程区	整体区域	0.521 7	63.710 8	8.945 9	-0.106 6	11.752 0	60.996 0
	赵氏河流域	0.360 5	44.175 7	17.084 3	-0.097 7	18.959 8	59.021 0
	漆沮河下游	0.499 5	61.085 4	15.775 9	-0.016 6	32.314 1	41.166 0
	沮河上游	0.873 8	78.257 0	2.109 2	-0.121 0	5.784 7	64.986 6
	漆水河两岸	0.353 1	60.189 7	11.378 8	-0.191 0	12.203 7	57.606 1
自然恢复区		0.759 5	69.557 6	4.664 8	-0.009 3	4.750 1	68.240 6

域 57.606 1%，这表明自然恢复区域更易受到温度变化的影响。

1990—2020 年耀州区 NDVI 与降水量的偏相关系数均值为 0.68，整体呈现正相关性。其中，沮河上游工程区植被恢复与降水量的相关性最高，显著正相关占该区域 78.257 0%，该区域生态治理项目主要为水土流失治理、河道综合整治和水源地保护，河网分布处正显著程度最高；自然恢复区相关性次于沮河上游工程区，显著正相关占该区域 69.557 6%。

4.3 气候和人类活动的相对贡献率分析

4.3.1 气候和人类活动影响下的植被变化趋势

在植被覆盖呈现增长趋势的区域中，其变化成因包括气候变化和人类活动共同影响、气候变化主导和人类活动主导(图 12)。植被改善区域占研究区 94.25%，其中，气候变化和人类活动引起植被改

善区域占研究区 13.09%，主要分布在东南区域以及生态修复工程区域。由气候变化主导的植被改善区域占研究区 0.62%，零星分布于研究区东南区域。由人类活动主导的植被改善区域占 80.54%，分布于研究区绝大部分区域。

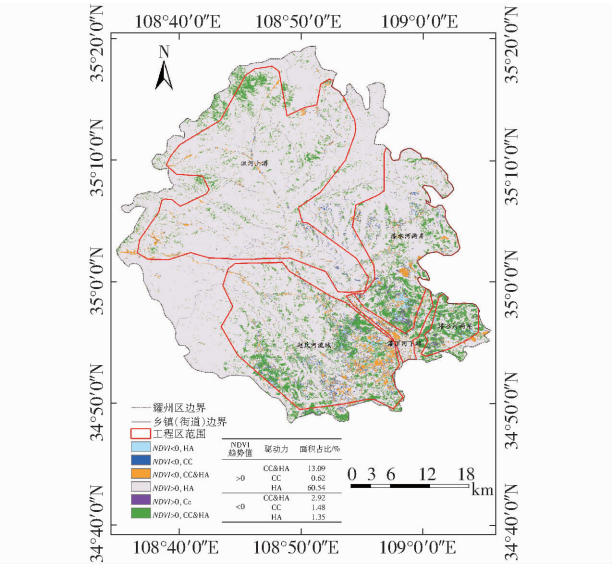


图 12　2000—2020 年植被覆盖变化的驱动因素空间分布图

Fig. 12　Spatial distribution of driving factors of vegetation cover change from 2000 to 2020

在植被覆盖呈现下降趋势的区域中，其变化成因包括气候变化和人类活动共同影响（CC&HA）、气候变化主导（CC）和人类活动主导（HA）。植被退化区域占研究区 7.20%，其中，气候变化和人类活动引起植被退化区域占研究区 3.63%，主要分布在赵氏河流域工程区内的中心城区，其他部分零散分布于研究区北部、西部和东南部。由气候变化主导的植被退化区域占研究区 1.80%，主要分布于漆水河两岸中北岸区域（表 9）。由人类活动主导的植被退化区域占 1.77%，主要分布于赵氏河流域工程区内的中心城区及漆水河两岸工程区的董家河镇等人造地表处。

表 9　2000—2020 年生态修复区与自然恢复区驱动因素占比

Tab. 9　Proportion of driving factors in ecological restoration area and natural regeneration area from 2000 to 2020　%

NDVI 变化趋势值	驱动力	不同区域面积占比					
		生态修复区	赵氏河流域	漆沮河流域	沮河流域	漆水河流域	自然恢复区
>0	CC&HA	14.67	18.45	17.77	8.23	22.48	28.33
	CC	0.81	1.22	0.65	0.04	1.85	27.52
	HA	77.32	67.49	59.97	89.22	67.86	41.83
<0	CC&HA	3.63	6.25	13.78	1.54	3.39	1.22
	CC	1.80	2.93	5.05	0.80	2.00	0.73
	HA	1.77	3.66	2.77	0.17	2.42	0.37

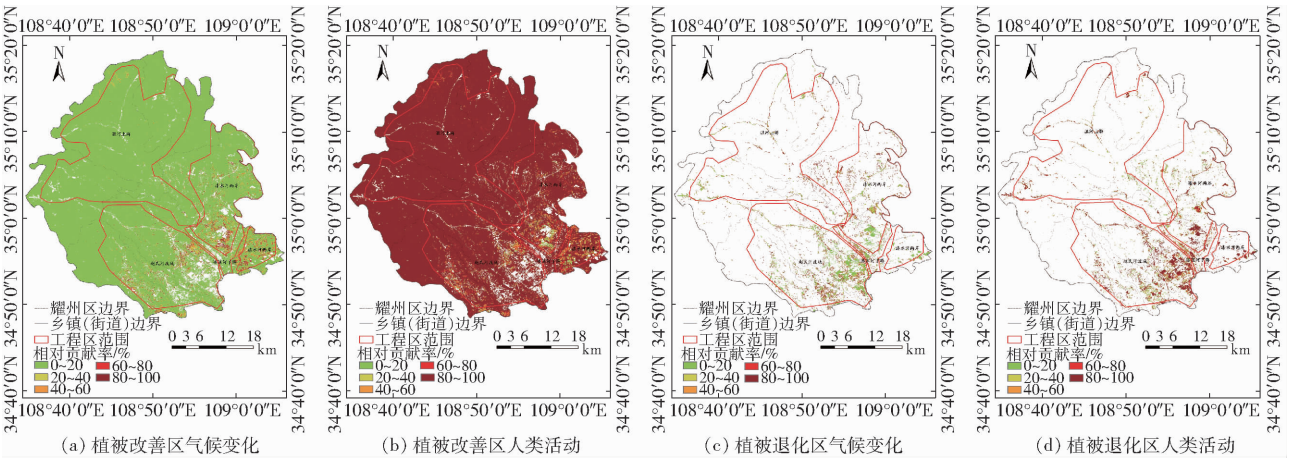
总的来说，生态修复工程区中由人类活动主导的植被改善区域占各区域绝大部分，由气候变化主导的植被改善区域占比极少，这表明该区域的植被改善状况应归因于人为主导的生态修复工程。生态修复区和自然恢复区中植被退化区域占比较小，引起退化的驱动因素主要为气候变化和人类活动的共同影响。

4.3.2　气候和人类活动对植被变化的相对贡献率

从 NDVI 增加区域来看，人类活动对植被改善的贡献相较于气候变化更大，平均贡献率为 79.1%，且在空间分布上来看，生态修复工程区与自然恢复区域受到的人类活动正向影响较大，而研究区中心城区等人类活动密集区域人类活动对植被改善的正向贡献率较低。气候变化对植被改善的平均贡献率为 15.22%，贡献率为 80% ~ 100% 区域较少，主要分布在东南区域；从 NDVI 减少区域来看，研究区植被退化区域较少，气候变化对植被退化的平均贡献率为 51.6%，人类活动对植被退化的平均贡献率为 64.2%，可见人类活动对植被退化的贡献较大。其中，生态修复工程区（66.8%）人类活动负向贡献率相较于自然恢复区域（51.3%）较高，由于生态修复区即为整个研究区受人类活动影响最大的区域，植被退化受人类活动破坏影响较大，而自然恢复区生态系统较为稳定，较少受到人类活动的破坏（图 13、表 10 和表 11）。

人类活动对各个生态修复工程区域的贡献较大，其中沮河上游工程区的人类正向贡献率最高（87.2%），漆沮河下游工程区次之（79.8%），这表明耀州区生态修复工程实施效果较明显，沮河上游工程区实施效果最为显著，该区域水土流失治理、河道综合整治效果明显。

植被变化主要受到气候变化与人类活动共同影响，植被变化趋势呈现增加的区域主要受到人类活动的影响，其中，频繁的人类活动导致研究区土地覆盖类型快速变化。通过对研究区 2000—2020 年进行土地变化转移矩阵分析发现（表 12），耕地和草地面积有所减少，林地面积基本不变，人造地表和水体面积增加，表明生态修复工程对研究区起到了一定的良好作用。城市扩张的加剧，导致生态修复工程区内部分草地和耕地转换成人造地表（增加45.89 km^2），部分地区植被覆盖相应降低。对于气候变化的影响，在属于半干旱地区的研究区内，植被生长主要受到降水的影响，水分增多，越能促进植被的生长恢复。



(a) 植被改善区气候变化 (b) 植被改善区人类活动 (c) 植被退化区气候变化 (d) 植被退化区人类活动

图 13 2000—2020 年气候变化和人类活动对植被覆盖变化的相对贡献率

Fig. 13 Relative contribution rates of climate change and human activities to vegetation cover change from 2000 to 2020

表 10 不同植被恢复区域气候变化和人类活动相对贡献率面积占比

Tab. 10 Area proportion of relative contribution rate of climate change and human activities in different vegetation restoration regions %

NDVI 变化类型		相对贡献率/%				
		0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
NDVI 增加区	气候变化	94.57	2.90	1.09	0.43	1.01
	人类活动	1.01	0.57	1.28	2.95	94.19
NDVI 减少区	气候变化	44.31	14.66	7.81	4.25	28.97
	人类活动	28.50	5.27	7.69	12.54	46.00

表 11 生态修复和自然恢复区域气候变化和人类活动贡献率

Tab. 11 Contribution rate of climate change and human activities inecological restoration and natural regeneration areas %

NDVI 变化类型	区域	气候贡献率	人类贡献率
NDVI 增加区	生态修复工程区	15.7	77.4
	赵氏河流域	15.6	76.6
	漆沮河下游	15.4	79.8
	沮河上游	11.1	87.2
	漆水河两岸	19.4	70.6
	自然恢复区	13.6	67.9
NDVI 减少区	生态修复工程区	33.4	66.8
	赵氏河流域	32.2	67.2
	漆沮河下游	31.2	68.1
	沮河上游	34.6	61.3
	漆水河两岸	36.8	64.2
	自然恢复区	23.7	51.3

注:生态修复工程区为赵氏河流域工程区、漆沮河下游工程区、沮河上游工程区和漆水河两岸工程区的整体区域。

5 讨论

植被变化对气候变化与人类活动的响应机制研究较为复杂,随着国家山水林田湖草工程的推进,近年来黄土高原生态工程区治理成效评价已成为研究的热点。本研究发现铜川市生态修复工程区植被恢复受到气候变化和人类活动的影响,一方面,近年来黄土高原平均温度总体上升[39],有助于植被生长;另一方面,植被恢复的关键影响因素为生态工程的实施,耀州区各个生态工程区内植被恢复主要受到人类活动正向驱动,相对贡献率为 79.10%,此结果与金凯等[37]、常铮等[40]和李依璇等[41]的研究基本一致。气候变化和人类活动也能抑制植被生长,甚至产生退化的趋势。气候变化抑制区域主要分布在河流沿岸,研究区为易旱区,气候变暖可能会加剧水资源短缺,从而抑制植被生长;人类活动抑制区域分布在赵氏河流域、漆沮河下游的中心城区,这一现象离不开城市化扩张对农田和林地的侵占。

从生态修复和自然恢复尺度来看,生态工程区的气候贡献率相较于自然恢复区高,这是由于生态工程区为人类活动较为频繁的区域,而自然恢复区域主要以森林资源为主,因此其生态系统较为稳定,不易受到气候环境的影响。生态工程区人为贡献率普遍高于自然恢复贡献率,沮河上游工程区的人类正向贡献率最高,可见耀州区生态工程实施得到了积极的反馈。值得注意的是,划分为自然恢复的地区受到人类活动正向贡献率 41.83% 的影响,这可能是因为本研究的划分标准为《2017 年陕西省黄土高原生态保护修复实施方案》,而研究时间尺度为 1990—2020 年,未考虑到 1999 年与 2017 年生态修复区域不一致的范围,因此本研究中自然恢复区的植被恢复受到了 1999 年以来生态工程的影响。本文 3.2.1 节趋势分析发现在 2017—2020 年植被整体增长速率较快,且生态修复工程区域的植被增长速率普遍高于自然恢复区,表明该工程项目对于提升植被覆盖有促进作用,由于 5 年植被生长时间较短,在 2017—2020 年期间植被覆盖变化程度不够显

表 12　2000—2020 年土地覆盖类型面积转移矩阵

Tab. 12　Change of land cover type area transfer matrix from 2000 to 2020　　km^2

年份	类型	2000 年					
		草地	耕地	林地	人造地表	水体	总计
2020 年	草地	59.95	8.15	20.08	0.02	20.11	108.31
	耕地	20.31	577.42	15.17	6.18	19.46	638.54
	林地	17.15	14.30	731.51	0.07	0.17	763.20
	人造地表	2.85	49.15	0.16	25.77	0.00	77.93
	水体	24.13	20.34	15.26	0	63.11	122.84
	总计	124.39	669.36	782.18	32.04	102.85	1 710.82
	类型变化	64.44	91.94	50.67	6.27	39.74	
	年际差异	-16.08	-30.82	-18.98	45.89	19.99	

著，因此其效益的发挥具有滞后性。

本文所使用的多元回归残差分析法可以较好地分离气候变化和人类活动对植被变化的相对贡献，但是该方法没有明确的物理机制，更多是统计意义上的模型方法。不同的研究范围、研究时段、数据选取等可能会产生研究结果的差异[37]，需从数据误差、数据在时间上的一致性、分析方法等多方面充分论证。此外，由于研究区内气候活动以及人类活动复杂多变，仅靠本研究分析不能全面解释植被变化的驱动机制。因此，如何有效、定量化分析气候与人类对植被变化影响的具体机制，是后续探讨的方向。

6　结论

（1）耀州区 1990—2020 年土地覆盖类型主要有林地、耕地、草地、水体和人造地表，覆盖面积从大到小依次为林地、耕地、草地、水体、人造地表。土地覆盖格局整体呈现自东南向西北耕地逐渐减少、林地草地逐渐增加的分布特征。2000—2020 年，水体和人造地表面积均有所增加，其中人造地表增长幅度最大，耕地和草地呈现轻微减少的趋势，林地面积基本保持不变。

（2）耀州区 1990—2020 年植被覆盖格局呈现自西北向东南由高到低的分布特征，主要以中高和高植被覆盖区域分布较多。植被覆盖变化特征呈现以速率 0.55%/a 波动上升的趋势，上升突变点为 2007 年。生态修复工程区 NDVI 增长速率稍高于自然恢复区，沮河上游工程区 NDVI 增长速率较其他工程区域快；植被变化与气温整体呈正相关，与降水量呈负相关，且植被恢复与降水量的相关性相较于气温较弱，气温是限制植被生长的主要气候因子。

（3）气候变化和人类活动对耀州区植被变化的相对贡献率具有一定的异质性，主要受到人类活动的正向驱动，相对贡献率为 79.10%，气候变化相对贡献率为 15.22%。在植被改善区域，应归因于以人类活动主导的生态恢复工程，生态修复工程项目实施治理效果较好，其中沮河上游工程区植被恢复效果最佳；在植被退化区域，引起退化的驱动因素主要为气候变化和人类活动的共同影响。植被生长对人类活动的影响更为敏感，对恶劣气候变化的影响较为敏感，而生态环境越好的区域，其生态系统更为稳定，越不易受到外界环境的影响。

参　考　文　献

[1] YE W, VAN DIJK A I J M, HUETE A, et al. Global trends in vegetation seasonality in the GIMMS NDVI3g and their robustness[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 94: 102238.

[2] ZHOU Z, DING Y, SHI H, et al. Analysis and prediction of vegetation dynamic changes in China: past, present and future [J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106642.

[3] 黎雅楠，马建业. 基于遥感的黄土丘陵沟壑区植被覆盖动态监测[J]. 西部大开发(土地开发工程研究)，2019(7)：7-13.
LI Ya'nan, MA Jianye. Dynamic monitoring of vegetation cover in gully and hilly region of Loess Plateau based on remote sensing[J]. Western Development (Land Development Engineering Research), 2019(7): 7-13. (in Chinese)

[4] 张家政，李崇贵，王涛. 黄土高原植被覆盖时空变化及原因[J]. 水土保持研究，2022，29(1)：224-230，241.
ZHANG Jiazheng, LI Chonggui, WANG Tao. Dynamic changes of vegetation coverage on the Loess Plateau and its factors[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 224-230, 241. (in Chinese)

[5] ZHANG C, GUO S, GUAN Y, et al. Temporal stability of vegetation cover across the Loess Plateau based on GIMMS during 1982—2013[J]. Sensors, 2021, 21(1): 315.

[6] 齐丽. 基于文献计量法的山水林田湖草研究概述[J]. 农技服务，2021，38(3)：109-111.
QI Li. Summary on the study of landscape, forest, field, lake and grass based on bibliometrics[J]. Agricultural Technological Services, 2021, 38(3): 109-111. (in Chinese)

[7] SHI S, YU J, WANG F, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over

multiple time scales on the Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2021, 755: 142419.
[8] 郭力宇,郭昭,王涛,等. 陕北黄土高原植被动态变化及其对气候因子的响应[J]. 西安科技大学学报,2019,39(2):317 - 326.
GUO Liyu, GUO Zhao, WANG Tao, et al. Dynamic changes of vegetation and its responses to climate factors in northern Shaanxi Loess Plateau region[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(2): 317 - 326. (in Chinese)
[9] 刘静,温仲明,刚成诚. 黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应[J]. 生态学报,2020,40(2):678 - 691.
LIU Jing, WEN Zhongming, GANG Chengcheng. Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(2):678 - 691. (in Chinese)
[10] ZHAI X, LIANG X, YAN C, et al. Vegetation dynamic changes and their response to ecological engineering in the Sanjiangyuan Region of China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(24): 4035.
[11] 张翀,白子怡,李学梅,等. 2001—2018 年黄土高原植被覆盖人为影响时空演变及归因分析[J]. 干旱区地理,2021,44(1):188 - 196.
ZHANG Chong, BAI Ziyi, LI Xuemei, et al. Spatio-temporal evolution and attribution analysis of human effects of vegetation cover on the Loess Plateau from 2001 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2021,44(1):188 - 196. (in Chinese)
[12] FANG J, YU G, LIU L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(16): 4015 - 4020.
[13] 唐见, 曹慧群, 陈进. 生态保护工程和气候变化对长江源区植被变化的影响量化[J]. 地理学报, 2019, 74(1): 76 - 86.
TANG Jian, CAO Huiqun, CHEN Jin. Effects of ecological conservation projects and climate variations on vegetation changes in the source region of the Yangtze River[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(1): 76 - 86. (in Chinese)
[14] JIANG M, TIAN S, ZHENG Z, et al. Human activity influences on vegetation cover changes in Beijing, China, from 2000 to 2015[J]. Remote Sensing, 2017, 9(3): 271.
[15] JIN K, WANG F, LI P. Responses of vegetation cover to environmental change in large cities of China[J]. Sustainability, 2018, 10(1): 270.
[16] PIAO S, YIN G, TAN J, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years[J]. Global Change Biology, 2015, 21(4): 1601 - 1609.
[17] 马思远. 黄土高原植被覆盖时空变化特征及驱动力分析——以河龙间西北片为例[D]. 郑州:河南农业大学,2019.
MA Siyuan. Spatial-temporal variation characteristics and driving force analysis of vegetation cover in Loess Plateau—taking the Northwest Helong Region as an sample[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[18] 董镱,尹冬勤,李渊,等. 黄土高原植被的时空变化及其驱动力分析研究[J]. 中国农业大学学报,2020,25(8):120 - 131.
DONG Yi, YIN Dongqin, LI Yuan, et al. Spatio-temporal patterns of vegetation change and driving forces in the Loess Plateau[J]. Journal of China Agricultural University, 2020,25(8):120 - 131. (in Chinese)
[19] 刘斌,孙艳玲,王中良,等. 华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析[J]. 自然资源学报,2015,30(1):12 - 23.
LIU Bin, SUN Yanling, WANG Zhongliang, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relative role of its influencing factors in North China[J]. Journal of Natural Resources, 2015,30(1):12 - 23. (in Chinese)
[20] 于璐,武志涛,杜自强,等. 气候变化背景下京津风沙源区人类活动对植被影响的量化分析[J]. 应用生态学报,2020,31(6):2007 - 2014.
YU Lu, WU Zhitao, DU Ziqiang, et al. Quantitative analysis of the effects of human activities on vegetation in the Beijing - Tianjin sandstorm source region under the climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(6):2007 - 2014. (in Chinese)
[21] 谢宝妮. 黄土高原近 30 年植被覆盖变化及其对气候变化的响应[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
XIE Baoni. Vegetation dynamics and climate change on the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
[22] 铜川市耀州区人民政府. 地质地貌[EB/OL]. (2021 - 04 - 13)[2021 - 06 - 06]. http://www.tongchuan.gov.cn/news_page.rt? channlId = 5706.
[23] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Publications of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379 - 1389.
[24] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报,2013,33(24):7798 - 7806.
YUAN Lihua, JIANG Weiguo, SHEN Wenming, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinca, 2013,33(24):7798 - 7806. (in Chinese)
[25] 章维鑫,曹建华,吴秀芹. 基于 Landsat 影像的石漠化区植被动态监测及治理效益研究[J]. 农业工程学报,2019,35(8):221 - 229.
ZHANG Weixin, CAO Jianhua, WU Xiuqin. Dynamic monitoring and control benefits of vegetation in rocky desertification areas based on Landsat images[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(8):221 - 229. (in Chinese)
[26] 田海静,王林,石俊华. 近 20 年中国北方草原植被长势动态监测[J]. 草业科学,2020,37(11):2165 - 2174.
TIAN Haijing, WANG Lin, SHI Junhua. Vegetation dynamics of the north Chinese grassland in the past 20 years[J]. Pratacultural Science, 2020,37(11):2165 - 2174. (in Chinese)
[27] 万华伟,王永财,侯鹏,等. 2001—2016 年中国生物多样性保护优先区域植被和水域动态监测与分析[J]. 生态与农村环境学报,2019,35(3):273 - 282.
WAN Huawei, WANG Yongcai, HOU Peng, et al. Monitoring and analysis on vegetation and waters dynamics in Chinese priority areas for biodiversity conservation during 2001—2016[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019,35(3):273 - 282. (in Chinese)

[28] 贺冉冉,马玲. 基于滑动窗口的非参数趋势检验在气候序列趋势和波动分析中的应用[C]//促进科技经济结合,服务创新驱动发展——蚌埠市科协 2012 年度学术年会论文集,2012:221 - 228.

[29] 李曹明,郑勇,黄启锋,等. 基于 Mann - Kendall 韶关汛期降水变化趋势及突变分析[J]. 韶关学院学报,2021,42(3):42 - 47.
LI Caoming, ZHENG Yong, HUANG Qifeng, et al. Analysis of precipitation change trend and mutation in flood season in Shaoguan based on Mann - Kendall[J]. Journal of Shaoguan University, 2021,42(3):42 - 47. (in Chinese)

[30] 陈鹏. 1982—2015 年黄土高原植被覆盖变化中气候和人类活动的贡献率研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2017.
CHEN Peng. Contributions of climate change and human to vegetation dynamics of Loess Plateau from 1982 to 2015[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University, 2017. (in Chinese)

[31] 张艺成,王光军,朱玉林. 九万山近 14 年植被变化与气候因子的相关关系[J]. 中南林业科技大学学报,2016,36(7):81 - 88.
ZHANG Yicheng, WANG Guangjun, ZHU Yulin. Relationship between NDVI and climate elements in Jiuwan mountain in the last 14 years[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016,36(7):81 - 88. (in Chinese)

[32] 宋鹏飞,季民,刘泽群,等. 山东省植被覆盖度变化与气候因子相关性分析[J]. 测绘科学,2020,45(3):81 - 86.
SONG Pengfei, JI Min, LIU Zequn, et al. Correlation analysis of vegetation coverage change and climate factors in Shandong Province[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020,45(3):81 - 86. (in Chinese)

[33] 刘阳,周忠发,闫利会. 2001—2018 年贵州省 NDVI 时空演变及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 水土保持通报,2021,41(1):327 - 336.
LIU Yang, ZHOU Zhongfa, YAN Lihui. Spatio-temporal variation in NDVI and its response to climate change and human activities in Guizhou Province during 2001—2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(1):327 - 336. (in Chinese)

[34] EVANS J, GEERKEN R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4): 535 - 554.

[35] GEERKEN R, ILAIWI M. Assessment of rangeland degradation and development of a strategy for rehabilitation[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 490 - 504.

[36] 李辉霞,刘国华,傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报,2011,31(19):5495 - 5504.
LI Huixia, LIU Guohua, FU Bojie. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(19):5495 - 5504. (in Chinese)

[37] 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.
JIN Kai, WANG Fei, HAN Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(5):961 - 974. (in Chinese)

[38] SUN W, SONG X, MU X, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 209: 87 - 99.

[39] 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[J]. 西安科技大学学报,2020,40(1):157 - 166.
MA Xiongwei, ZHAO Qingzhi, YAO Wanqiang. Time lags of vegetation to climate change and temporal characteristics in Loess Plateau[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2020,40(1):157 - 166. (in Chinese)

[40] 常铮,李崇贵,张家政,等. 基于 GEE 云平台的陕北黄土高原生态修复前后植被变化及原因[J]. 西安理工大学学报,2022,38(3):337 - 345.
CHANG Zheng, LI Chonggui, ZHANG Jiazheng, et al. Analysis of vegetation changes and causes before and after ecological restoration projects on the Loess Plateau in northern Shaanxi based on Google Earth Engine[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2022,38(3):337 - 345. (in Chinese)

[41] 李依璇,朱清科,石若莹,等. 2000—2018 年黄土高原植被覆盖时空变化及影响因素[J]. 中国水土保持科学(中英文),2021,19(4):60 - 68.
LI Yixuan, ZHU Qingke, SHI Ruoying, et al. Spatial and temporal changes of vegetation cover and its influencing factors in the Loess Plateau from 2000 to 2018[J]. Science of Soil and Water Conservation,2021,19(4):60 - 68. (in Chinese)