

# 黄土高原植被覆盖时空变化及原因

张家政, 李崇贵, 王涛

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054)

**摘要:**研究黄土高原地区植被覆盖动态变化及其与人类活动和气象因子的关系对评价区域生态环境质量及生态过程具有重要意义。以黄土高原 1982—2018 年 NDVI(1982—2011 年 GIMMS NDVI 和 2000—2018 年 MODIS NDVI)数据为基础,利用像元二分模型对植被覆盖度进行估算,借助植被绿度、相关分析和多元回归残差法分析了黄土高原植被覆盖度时空变化规律及其对人类活动和气象因子的响应特征。结果表明:(1)过去 37 年,黄土高原春、夏、秋和生长季植被覆盖度呈现升高趋势,且各季节 FVC 增加速率逐年升高,尤其以夏季和生长季增加速率的变化最为明显;(2)空间上,春、夏、秋和生长季 FVC 呈由西北向东南递增的趋势,且大部分地区呈显著上升趋势,植被呈现改善趋势的面积要大于呈现退化趋势的面积;(3)春、夏、秋和生长季人类活动对 FVC 主要以正面影响为主,且夏季人类活动对于 FVC 影响更为显著。在气象因素方面,FVC 与平均气温在夏季和生长季呈现显著正相关的区域面积占比较大,FVC 与总降水量在春季和秋季呈现显著正相关的区域面积占比较大。退耕还林(草)等生态工程的实施,使得黄土高原植被状态得到明显改善,但是城市扩张使得部分地区植被覆盖度呈现退化现象。

**关键词:**植被覆盖度;像元二分模型;时空变化;黄土高原;气象因子;人类活动

中图分类号:Q948.112

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0224-07

## Dynamic Changes of Vegetation Coverage on the Loess Plateau and Its Factors

ZHANG Jiazheng, LI Chonggui, WANG Tao

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Study of the dynamic changes of vegetation cover in the Loess Plateau and its relationship with human activities and meteorological factors is of great significance for evaluating regional ecological environment quality and ecological processes. Based on the data of the Loess Plateau NDVI from 1982 to 2018 (GIMMS NDVI from 1982 to 2011 and MODIS NDVI from 2000 to 2018), we used the dimidiate pixel model to estimate the vegetation coverage, and the temporal and spatial variation of vegetation coverage in the Loess Plateau and its response characteristics to human activities and meteorological factors were analyzed with the help of vegetation greenness, correlation analysis, multiple regression and residual method. The results show that: (1) in the past 37 years, the vegetation coverage in the spring, summer, autumn and growing seasons of the Loess Plateau had shown an increasing trend, and the increase rate of FVC in each season had increased year by year, especially in the summer and the growing season; (2) spatially, the FVC in spring, summer, autumn and growing seasons showed an increasing trend from northwest to southeast, and most of the areas have a significant increasing trend, and the area with improved vegetation cover is larger than that with degraded vegetation cover; (3) human activities in spring, summer, autumn and growing seasons mainly had positive effects on FVC, and human activities in summer had more significant impact on FVC. In terms of meteorological factors, the area where FVC and average temperature showed a significant positive correlation in summer and growing season accounted for a relatively large area, and the area where FVC and

收稿日期:2021-01-13

修回日期:2021-02-23

资助项目:林业资源培育及高效利用技术创新专项子课题“多尺度落叶松人工林生长预测”(2017YFD0600400)

第一作者:张家政(1994—),男,陕西西安人,硕士研究生,主要从事遥感原理与应用研究。E-mail:1113580100@qq.com

通信作者:李崇贵(1966—),男,四川西充人,博士,教授,主要从事林业遥感定量估测研究。E-mail:864958361@qq.com

total precipitation showed a significant positive correlation in spring and autumn accounted for a relatively large area. The implementation of ecological projects such as returning farmland to forest (grass) had significantly improved the vegetation status of the Loess Plateau, but urban expansion had caused the degradation of vegetation cover in some areas.

**Keywords:** vegetation coverage; dimidiate pixel model; temporal and spatial changes; Loess Plateau; meteorological factors; human activities

植被是连接水分、土壤和大气的纽带,也是陆地地表生态系统的主体部分<sup>[1-3]</sup>。植被不仅对荒漠化治理具有重要意义,而且与当地社会环境发展和整个生态稳定等方面都有密切联系,因此对区域内植被生长状况进行长时间序列动态变化监测具有重要的现实意义。植被覆盖度(Fractional Vegetation Coverage, FVC)是量化植被生长状态的关键因子,同时也是土壤侵蚀与水土流失的重要影响因子。利用归一化植被指数(Normalized Different Vegetation Index, NDVI),采用像元二分模型近似估算植被覆盖度进而分析植被动态变化<sup>[4]</sup>,可以为地区环境治理和生态环境变化提供科学的有力参考。

遥感技术在长时间序列植被变化监测研究具有显著优势。目前,长时间序列植被覆盖变化研究的数据来自 NOAA/AVHRR, SPOT/VGT, MODIS 等卫星传感器获取到的植被指数。国内外学者在不同遥感数据源的植被覆盖动态监测方面做了大量研究。如李晶等<sup>[5]</sup>基于 1985—2015 年 Landsat 影像获取年最大 NDVI 数据,采用像元二分模型计算不同时期宝日希勒矿区的植被覆盖度,并对其进行变化趋势分析,揭示了植被覆盖演变规律。邓兴隆等<sup>[6]</sup>选用 1982—2013 年 GIMMS NDVI 数据分析了中亚地区植被覆盖与降水和气温的关系,认为植被变化受降水影响强于受气温影响。孟浩斌等<sup>[7]</sup>基于 MODIS 数据采用像元二分模型研究三峡库区植被覆盖度变化在不同地形因子上的分布,认为植被覆盖变化在坡度分布差异最为显著。

黄土高原生态环境脆弱,水土流失严重,是我国生态环境建设与保护的重点区域。1999 年国家开始实施“退耕还林(草)”等生态修复工程,植被覆盖面积显著提高。黄土高原植被覆盖变化相关研究取得大量研究成果,多集中在以年际尺度人类活动或自然环境因子对植被覆盖变化影响方面,如孟晗等<sup>[8]</sup>研究认为黄土高原近 15 a 植被覆盖总体呈现增加趋势,降水量对植被影响大于温度对于植被响应。范倩倩等<sup>[9]</sup>研究同样认为 1982—2015 年黄土高原植被覆盖度呈上升趋势。董懿等<sup>[10]</sup>研究认为气候变化和人类活动共同对黄土高原植被存在影响,其中主要影响因

素是人类活动。刘静等<sup>[11]</sup>通过研究黄土高原全区 NDVI 与气温、降水和日照等气候因子相关性发现,NDVI 仅对降水的响应明显,对气温不存在显著关系。Li 等<sup>[12]</sup>通过退耕还林前后气象因子对植被的影响发现,黄土高原生长季平均 NDVI 受根系土壤水分决定,年平均 NDVI 受标准化蒸散亏缺指数(SE-DI)和降水决定。这些研究为黄土高原生态环境建设发挥了重要作用,但是由于植被改善与人类活动变化之间的关系不甚明了,已有研究多开展植被与降水、气温变化的相关性分析工作,对人类活动对于植被变化以及二者之间的关系研究较少,并且这些研究并没有从植被物候生长分析气象因子对其扰动。因此,本文利用黄土高原 1982—2018 年 NDVI(1982—2011 年 GIMMS NDVI 和 2000—2018 年 MODIS NDVI)数据为数据源,气温和降水数据为基础,利用像元二分法模型估算出黄土高原地区植被覆盖度时空变化,采用植被绿度模型、相关性分析法和残差分析法分析植被覆盖度变化特征及其对气象因子和人类活动的响应,以期为黄土高原生态环境恢复成效评价提供科学参考。

## 1 研究区概况

黄土高原是中国四大高原之一,其位于我国黄河流域中部,范围在 100°54′—114°33′E, 33°43′—41°16′N, 主要包括陕西、甘肃、宁夏、山西、内蒙古、河南、青海 7 省<sup>[13-14]</sup>(图 1),面积约为 63.4 万 km<sup>2</sup>。该区域地势西高东低,地势起伏较大,平均高程 0~5 217 m。黄土高原地区夏天炎热少雨,冬季干燥寒冷,年均气温为 9~12℃,年均降水量在 100~800 mm<sup>[15-16]</sup>,气温年、日较差大,且东部和西部的温度变化较大。黄土高原蒸发量普遍高于实际降水量,年蒸发量为 1 400~2 000 mm,总体趋势是东南低西北高,故导致水土流失严重,全年气候干燥。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据源及预处理

GIMMS NDVI3g 数据为美国马里兰大学 GLCF (Global Land Cover Facility) 研究组生产的 15 d 合

成产品数据,下载地址(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>),其空间分辨率为  $8\text{ km}\times 8\text{ km}$ ,时间尺度为 1982—2011 年。本数据为 NC4 格式文件,通过 MATLAB 对其进行解压、投影变换等处理,得到时间分辨率为 15 d、空间分辨率为  $8\text{ km}$  的 GIMMS NDVI 数据,对 15 d 数据采用最大合成法(Maximum Value Composition, MVC)进一步消除云和大气等异常值的影响<sup>[17]</sup>,最终得到月、年尺度的 GIMMS NDVI 数据集。

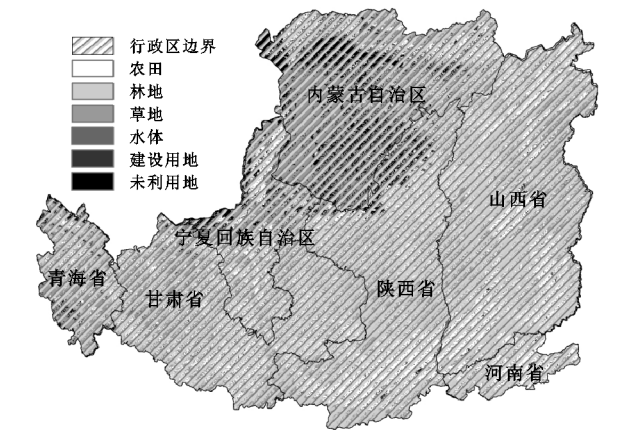
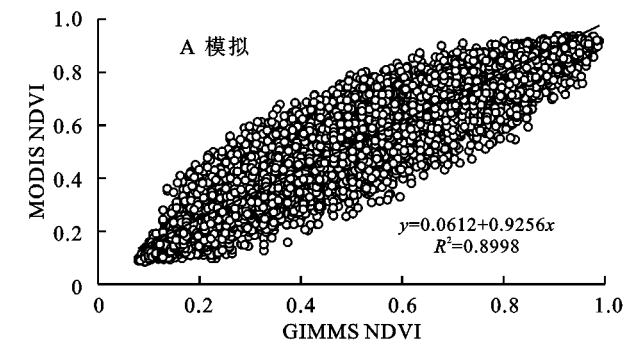


图 1 研究区示意图

MODIS NDVI 数据为美国国家航天航空局(NASA)提供的 MODIS 16 d 合成产品数据,下载地址(<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>),其空间分辨率为  $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ ,时间尺度为 2000—2018 年。利用 MRT 工具和 ENVI 软件进行格式转换、投影转换和拼接,利用 MVC 得到月、年尺度的 MODIS NDVI 数据集,然后利用 Python 进行研究区边界裁剪。对 MODIS 数据进行重采样,得到分辨率为  $8\text{ km}\times 8\text{ km}$  的逐月 NDVI 数据。

气象数据来源于国家科技基础条件平台—国家



2.3 像元二分法估算植被覆盖度

根据研究区像元值大小,我们可以通过混合像元法中的像元二分法模型进行地表植被覆盖度反演<sup>[19-21]</sup>。依据研究区影像上的 NDVI 的灰度分布情况,以 5%置信度截取 NDVI 的上下限阈值分别近似

地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)提供的月均气温(TEM)和总降水量(PRE)。该数据集空间分辨率为  $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ ,时间尺度为 1982—2018 年<sup>[18]</sup>。该数据为 NC 格式文件,利用 Python 进行数据预处理,使之变成可以使用的栅格图像。为了与 NDVI 数据空间分辨率相匹配,本文采用重采样方式将气候数据插值为  $8\text{ km}\times 8\text{ km}$  空间分辨率。

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),包括 1980 和 2018 年 2 期数据,空间分辨率为  $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 。土地利用类型包括农田、林地、草地、水体、建设用地和未利用地 6 大类。

2.2 GIMMS NDVI 数据时间序列插补

由于两种数据源来自于不同传感器,必须进行重构以获取连续且效果明显的长时序数据集。基于 2000—2011 年交叉年份的 GIMMS NDVI 与 MODIS NDVI 月值数据,通过对两种数据进行相关性分析发现 2010 年的两种数据具有明显显著性相关(相关系数为 0.987 3,  $p<0.001$ )。因此,本文以 2010 年 MODIS 年最大 NDVI 为因变量, GIMMS 年最大 NDVI 为自变量,获取两者的回归方程:  $y=0.9256x+0.0612$ ,  $R^2=0.899\ 8$ (图 2A)。一致性检验结果显示(图 2B),应用 MODIS NDVI 数据对 GIMMS NDVI 数据进行时间序列拟合,两者数据拟合效果最好,说明 2012—2018 年 NDVI 延长数据可以用于 1982—2011 年 GIMMS NDVI 数据的延长,建立的 1982—2018 年长时间序列 NDVI 数据集可以进行植被覆盖变化的研究。

本文沿用 MVC 的思想获取月、季节(3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,4—9 月为植被生长季)NDVI 数据集。

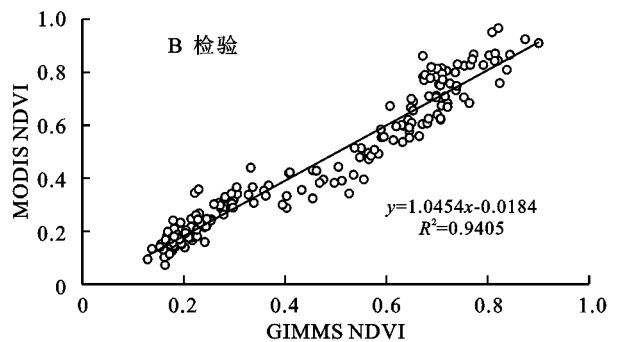


图 2 GIMMS 模拟 NDVI 与 GIMMS NDVI 检验

代表  $\text{NDVI}_{\text{soil}}$  和  $\text{NDVI}_{\text{veg}}$ 。其计算公式如下:

$$\text{FVC} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}$$

式中:FVC 表示植被面积占总像元面积的比率; $\text{NDVI}_{\text{veg}}$  表示全植被覆盖像元 NDVI; $\text{NDVI}_{\text{soil}}$  表示无植被覆



盖裸土像元 NDVI。

## 2.4 植被绿度变化率分析

研究表明,植被的绿度变化率<sup>[22-23]</sup>(GRC)能真实有效反映植被的年际变化。采用绿度变化率模拟 1982—2018 年黄土高原植被变化趋势,计算公式为:

$$GRC = \frac{n \sum_{i=1}^n i FVC_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n FVC_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

式中:变量  $n$  为年序列长度; $FVC_i$  表示第  $i$  年的 FVC。当 GRC 值为正时,说明在  $n$  年 FVC 是呈增加趋势变化的,植被得到改善;否则,当 GRC 的值为负时,则表示 FVC 有减小趋势,植被有退化趋势。

## 2.5 多元回归残差分析

基于单个像元采用多元回归残差分析方法建立 FVC—气象因子的理想回归方程<sup>[24-26]</sup>,具体有以下 3 个步骤:(1) 基于 FVC 以及气象因子(TEM 和 PRE)时间序列数据,以 FVC 为因变量、气象因子为自变量,建立线性回归方程,计算模型中的各项参数;(2) 基于气象因子数据以及模型回归参数,计算 FVC 预测值( $FVC_{c-f}$ ),用来表示仅受气象因子对 FVC 的影响;(3) 计算 FVC 观测值( $FVC_{c-p}$ )与 FVC 预测值的差值,即 FVC 残差( $\xi$ ),用来表示仅受人类活动对 FVC 的影响。

$$FVC_{c-f} = a \times TEM + b \times PRE + c$$

$$\xi = FVC_{c-p} - FVC_{c-f}$$

式中: $a$ 、 $b$  和  $c$  为模型参数; $\xi$  为 FVC 残差。当  $\xi > 0$  时,表示人类活动对植被有积极影响;当  $\xi = 0$  时,表示人类活动对植被无显著影响;当  $\xi < 0$  时,表示人类活动对植被有消极影响。

# 3 结果与分析

## 3.1 黄土高原植被覆盖度动态演变特征

3.1.1 植被覆盖度的变化特征 本研究基于像元尺度计算研究区春、夏、秋和生长季 FVC 变化趋势(图 3)。黄土高原 1982—2018 年植被覆盖波动变化较大,但总体呈现增长趋势( $p < 0.01$ ),其春、夏、秋和生长季增长速率分别 0.001 2/a, 0.004 4/a, 0.002 4/a 和 0.004 4/a,且各时期后期增加速率均远高于前期,尤其以夏季和生长季增加速率的变化最为明显,年均增长率分别为 0.969 9% 和 0.947 1%。而秋季增加速率呈现不显著增加趋势,其年均增长率稳定在 0.461 9%。在 4 种曲线中,1982—1998 年春、夏、秋和生长季年变化幅度较小,其平均增长率分别为 0.918 1%, 0.770 2%, 0.137 9% 和 0.645 1%。但自 1999 年大规模实施“退耕还林(草)”工程建设以

来,黄土高原 FVC 呈现显著增加趋势<sup>[27-28]</sup>,1999—2018 年春、夏、秋和生长季年均增长率分别增加到 1.143 1%, 1.373 4%, 0.990 7% 和 1.479 1%,植被覆盖情况得到明显改善。

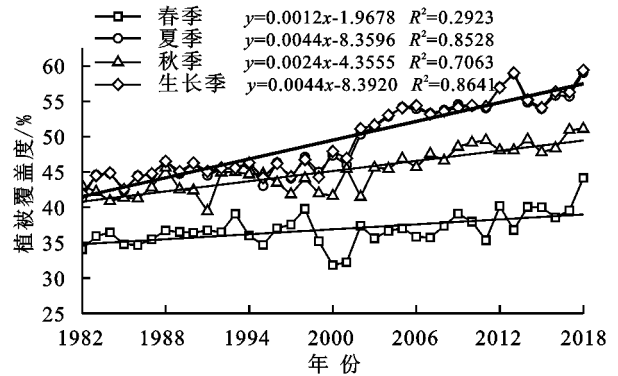


图 3 1982—2018 年黄土高原各季 FVC

3.1.2 植被覆盖度动态变化特征 采用绿度变化率趋势法来分析黄土高原植被 FVC 空间分布特征,并将其 GRC 分为 4 级,分别为严重退化( $-0.035 < GRC < -0.013$ )、退化( $-0.013 \leq GRC < 0$ )、改善( $0 \leq GRC < 0.019$ )和明显改善( $0.019 \leq GRC < 0.039$ )进一步分析黄土高原变化趋势空间分布(图 4)。黄土高原趋势分析结果表明春、夏、秋和生长季 FVC 在大部分区域呈上升趋势,春、夏、秋和生长季平均变化率分别为 0.084 7%, 0.436 2%, 0.216 0% 和 0.420 6%。主要分布在陕北地区、宁夏回族自治区南部和山西中西部的吕梁—太行山等地,这些区域均为国家实施退耕还林(草)项目重要区域。虽然 FVC 整体均呈现改善状态,但由于城镇化建设,银川、呼和浩特等大城市的城郊区域,植被覆盖呈现下降趋势,受人类活动的影响,植被退化严重。

春季植被占研究区 61.66% 的区域呈现改善趋势,主要分布在太行山中段等区域,其中 0.255% 的区域,呈现显著增加( $p < 0.01$ )。而植被呈现退化趋势主要分布在内蒙古巴彦淖尔和呼和浩特、陕西西安和渭南、山西太原和晋中等区域,其中 1.479% 的区域呈现显著减少( $p < 0.01$ )。春季万物复苏,但气温回升明显蒸散量加大,加剧了土壤水分的亏缺,导致半干旱地区更加干旱,从而加剧了植被的退化。夏季和生长季表现出空间上一致性,植被占研究区 78.53% 和 78.46% 区域呈现改善,主要分布在宁夏南部、内蒙古阿拉善盟和巴彦淖尔、晋陕丘陵等区域,其中 1.249% 和 1.121% 的区域呈现显著增加( $p < 0.01$ )。而植被呈现退化趋势地区主要分布在内蒙古鄂尔多斯、宁夏银川、甘肃庆阳和白银、青海西宁等区域,其中 0.644% 和 0.583% 的区域呈现显著减少( $p < 0.01$ ),夏

季黄土高原西部尤其以宁夏平原、汾渭盆地等地区植被覆盖度出现大幅度下降,这是由于该地区主要粮食作物为小麦,夏季正好是小麦收获季节。

秋季植被占研究区 69.07% 的区域呈现改善趋势,主要分布在陕北地区、甘肃固原、内蒙古东胜等区域,其中 0.229% 的区域呈现显著增加( $p < 0.01$ )。这

是由于植被对气温和降水存在一定滞后性,夏季降水的累积导致秋季土壤含水量增加,故导致秋季植被呈现显著性增加趋势面积高于夏季和生长季。而植被呈现退化趋势地区主要分布在青海西宁、河南郑州、宁夏银川、陕西西安和宝鸡等区域,其中 1.65% 的区域呈现显著减少( $p < 0.01$ )。

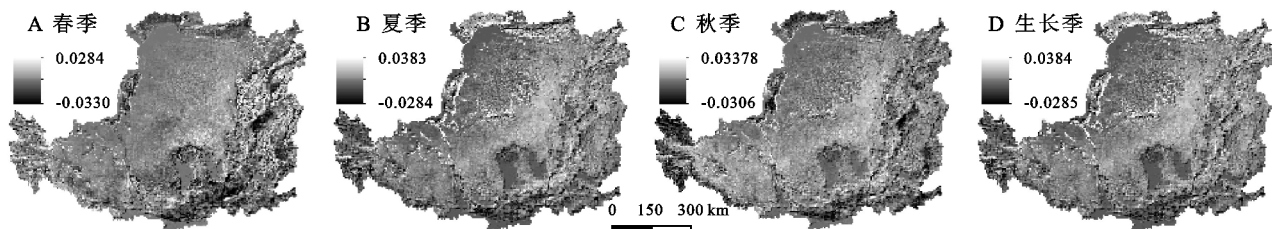


图4 基于植被绿度变化率的黄土高原 FVC 变化趋势空间分布

### 3.2 人类活动和气候变化对于 FVC 的影响

3.2.1 人类活动对于 FVC 的响应 本文通过 FVC 与 TEM 和 PRE 的回归分析,基于像元尺度分析人类活动对于 FVC 的影响(图 5)。

春季残差为正的面积占研究区总面积的 55.79%,且其平均变化率为 0.056%/a,说明在春季人类活动对 FVC 主要以正面影响为主。人类活动产生正面影响较为明显区域占比 4.65% (0.010~0.035),主要分布在陕西境内子午岭,山西太行山等地区,表明这些区域人类活动对植被变化产生积极影响;而人类活动产生负面影响较为明显区域占比 0.92% (-0.031~-0.015),主要分布在汾渭盆地的城镇地区及银川和呼和浩特等一些大型城市,表明这些区域人类活动对植被变化产生消极作用。而在夏和生长季残差则表现出空间上的一致性,其面积为正的区域分别占研

究区总面积的 64.79% 和 61.33%,其平均变化率分别为 0.22%/a 和 0.17%/a,说明在夏季和生长季人类活动对 FVC 主要以正面影响为主。但人类活动在夏季和生长季均没有影响较为明显区域,只是零星的分布在研究区内部。秋季残差为正的面积占研究区总面积的 64.63%,且其平均变化率为 0.17%/a,说明在秋季人类活动对 FVC 主要以正面影响为主。人类活动产生正面影响较为明显区域占比 0.84% (0.015~0.029),主要分布在渭河南部和山西汾河以西等地区,表明这些区域人类活动对植被变化产生积极影响;而人类活动产生负面影响较为明显区域占比 0.52% (-0.028~-0.010),主要分布在汾渭盆地的城镇地区及西宁、兰州、太原和呼和浩特等一些大型城市,表明这些区域人类活动对植被变化产生消极作用。

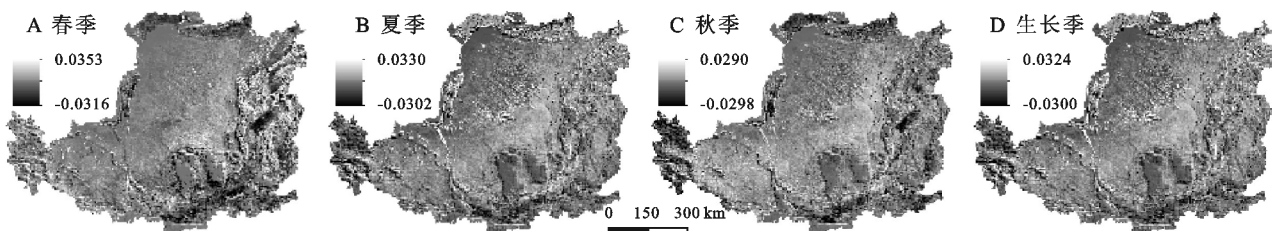


图5 人类活动对黄土高原 FVC 影响趋势空间分布

3.2.2 气候变化对于 FVC 的响应 通过上述描述的基于像元尺度的相关分析方法,本研究从季节尺度上(春、夏、秋和生长季)分析了黄土高原地区 37 a 的 FVC 与气象因子(气温和降水)相关分析( $p < 0.05$ ),利用相关系数来分析气象因子与植被的相关程度(图 6—7)。黄土高原地区的 FVC 与温度和降水总体上呈正相关关系。春季 FVC 的变化与温度和降水变化的相关系数分别为 0.070, 0.139。说明春季植被对降雨相对于温度响应更加敏感。就降雨而言,相关系数较高地区主要集中在渭河以北和泾水以西等地区,相关系数为 0.524~0.613;与降雨相比,温度相关系数

就不是很敏感,但 FVC 与温度在陕西延安和榆林等地区,相关系数为 0.514~0.692。夏季 FVC 变化与温度和降雨变化的相关系数分别为 0.185, 0.131。说明夏季植被对温度相对于降雨响应更加敏感。就温度而言,研究区 78.09% 地区呈正相关趋势,其中 43.16% 地区呈显著正相关趋势( $p < 0.01$ ),但总体相关性仍然较低( $R = 0.198$ ),相关系数较高地区主要集中在陕北地区和内蒙古巴彦淖尔等地;与温度相比,降雨相关系数较高地区主要集中在陕北地区、山西太行山和吕梁山等地区,相关系数分别为 0.326, 0.358。秋季 FVC 的变化与温度和降雨变化的相关



系数分别为 0.085 和 0.117,说明秋季植被与降雨相对于温度响应更为敏感。

黄土高原植被生长季 FVC 与温度呈正相关,相关系数为 0.200( $p<0.05$ );而泾渭盆地中南部等地区的植被 FVC 与温度呈负相关,相关系数为 $-0.512\sim-0.134$ ;余下的地方植被 FVC 与温度也是正相关,相关系数为 $0\sim0.564$ 。由于温度上升,加剧了水分的蒸发,植被生长所需要的水分就会减少,减缓了植被

的生长。黄土高原植被 FVC 与降雨总体上呈正相关,相关系数为 0.184( $p<0.05$ )。其中,内蒙古鄂尔多斯和关中平原等地区的植被 FVC 与降雨呈负相关,相关系数为 $-0.461\sim0$ ;山西太行山和吕梁山等地区的植被 FVC 与降雨呈显著正相关,相关系数为 $0.521\sim0.601$ ;余下其他地区的植被 FVC 与降雨也是正相关,相关系数为 $0\sim0.31$ 。由此说明降雨对黄土高原地区总体上起到正面作用。

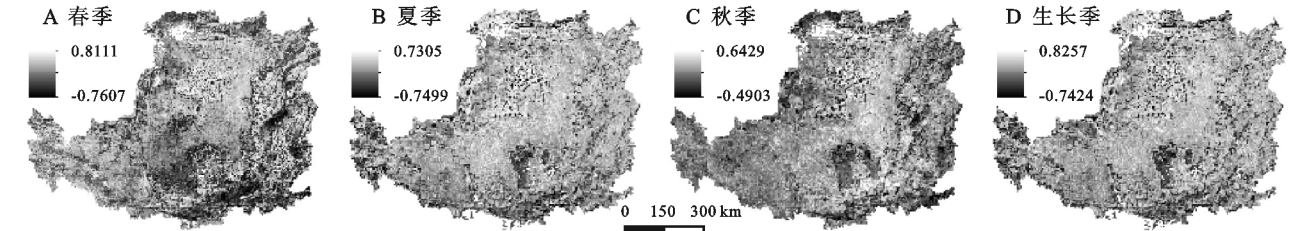


图 6 黄土高原 FVC 变化与温度相关系数

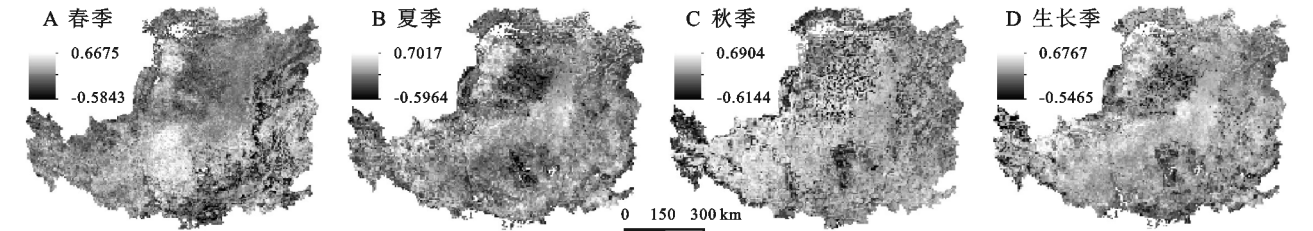


图 7 黄土高原 FVC 变化与降雨相关系数

4 讨论

随着国家对黄土高原生态环境的治理以及一系列相关政策的实施,近年来黄土高原植被动态变化规律已经成为目前研究的热点。在植被 FVC 的空间变化方面,本文研究发现黄土高原春、夏、秋和生长季 FVC 整体均呈现显著性增加趋势,这与孟晗等<sup>[8]</sup>、史晓亮等<sup>[29]</sup>研究结论基本一致。

另外,已有研究表明,气象因子尤其是温度<sup>[30-31]</sup>和降雨<sup>[32-33]</sup>会对黄土高原植被生长产生一定影响。因此,本文进一步对温度和降雨进行分析,并定量探究了不同季节黄土高原 FVC 与气象因子的相关性以及人类活动对植被产生的影响,以此揭示了不同季节植被对气象因子以及人类活动的响应规律。在植被动态与气象因子的关系方面,本文研究结果表明,

FVC 与温度在夏季和生长季呈现显著正相关的区域为黄土高原中部和南部地区,秋季呈现显著正相关的区域较少。FVC 与降雨在秋季和生长季呈现显著正相关,说明降雨响应存在一定的滞后性<sup>[34-35]</sup>,夏季降水的累积,导致秋季土壤含水量增加。

植被覆盖变化受气象因子和人类活动共同影响,人类活动的加剧使得黄土高原土地利用类型快速变化。由 1980—2018 年黄土高原土地利用转移矩阵(表 1)可以看出,1980—2018 年以来,农田、林地和草地是黄土高原主要的土地利用类型,农田、草地和未利用土地的面积减少,而林地和建筑用地面积增加,说明一系列生态工程活动对黄土高原起到了良好的作用。虽然林地覆盖情况有所改善,但是随着城镇化的发展,建筑用地急剧增加(增加 13 861 km<sup>2</sup>),部分草地和耕地转化为建筑用地,从而导致部分地区植被覆盖度有所降低。

表 1 黄土高原 1980—2018 年土地利用转移矩阵 km<sup>2</sup>

| 年份     | 类型   | 1980 年 |       |        |      |       |      |
|--------|------|--------|-------|--------|------|-------|------|
|        |      | 农田     | 林地    | 草地     | 建筑用地 | 未利用地  | 水体   |
| 2018 年 | 农田   | 115784 | 11052 | 56491  | 6472 | 3217  | 2795 |
|        | 林地   | 13135  | 58540 | 23925  | 334  | 1172  | 370  |
|        | 草地   | 58027  | 21960 | 164742 | 1844 | 12722 | 2081 |
|        | 建筑用地 | 14103  | 1292  | 5887   | 4266 | 957   | 609  |
|        | 未利用地 | 1649   | 778   | 10149  | 116  | 25821 | 680  |
|        | 水体   | 2300   | 403   | 2016   | 221  | 639   | 3157 |

## 5 结论

(1) 黄土高原 1982—2018 年春、夏、秋和生长季平均 FVC 总体呈现增加趋势,尤其是自 1999 年国家实施退耕还林(草)工程之后,植被覆盖度增加趋势更为明显。

(2) 在空间上,黄土高原春、夏、秋、生长季 FVC 呈现由西北部到东南部过渡的趋势,植被呈现改善趋势的面积要大于呈现退化趋势的面积。

(3) 在人类活动中,春、夏、秋和生长季人类活动对 FVC 主要以正面影响为主,其中春、夏、秋和生长季人类活动对 FVC 影响为正的面积分别占研究区总面积的 55.79%,64.79%,64.63% 和 61.33%。在气象因子中,黄土高原 FVC 对温度和降雨的响应存在明显的差异。在空间上,FVC 与温度在夏季和生长季呈现显著正相关的区域面积占比较大,主要在黄土高原中部和南部地区。FVC 与降雨在春季和秋季呈现显著正相关的区域面积占比较大。

### 参考文献:

- [1] Meyer W B, Turner B L. Human population growth and global land-use/cover change[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1992,23(1):39-61.
- [2] 刘洋,李诚志,刘志辉,等.1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J].*生态学报*,2016,36(19):6198-6208.
- [3] 童珊,曹广超,曹生奎.近 34 年祁连山南坡植被覆盖变化与气象因子关系研究[J].*长江流域资源与环境*,2020,29(12):2655-2664.
- [4] 龙昊宇,翁白莎,黄彬彬,等.1984—2017 年洪泽湖湿地植被覆盖度变化及对水位的响应[J].*水生态学杂志*,2020,41(5):98-106.
- [5] 李晶,崔绿园,闫萧萧,等.草原矿区长时序植被覆盖度变化趋势对比分析[J].*测绘通报*,2019(8):130-134.
- [6] 邓兴耀,姚俊强,刘志辉.基于 GIMMS NDVI 的中亚干旱区植被覆盖时空变化[J].*干旱区研究*,2017,34(1):10-19.
- [7] 孟浩斌,周启刚,李明慧,等.基于 MODIS 像元尺度的三峡库区植被覆盖度变化的地形分布特征[J].*长江流域资源与环境*,2020,29(8):1790-1799.
- [8] 孟晗,黄远程,史晓亮.黄土高原地区 2001—2015 年植被覆盖变化及气候影响因子[J].*西北林学院学报*,2019,34(1):211-217.
- [9] 范倩倩,赵安周,王金杰,等.1982—2015 年黄土高原 NDVI 时空演变及其对气候变化的季节响应[J].*生态学报*,2020,39(5):1664-1675.
- [10] 董懿,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.
- [11] 刘静,温仲明,刚成诚.黄土高原不同植被覆盖类型 NDVI 对气候变化的响应[J].*生态学报*,2020,40(2):678-691.
- [12] Li G, Sun S, Han J, et al. Impacts of Chinese Grain for Green program and climate change on vegetation in the Loess Plateau during 1982-2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,660:177-187.
- [13] 邵蕊,李焱,张宝庆.黄土高原退耕还林(草)以来植被水分利用效率的时空特征及预测[J].*科技导报*,2020,38(17):81-91.
- [14] 孙锐,陈少辉,苏红波.黄土高原不同生态类型 NDVI 时空变化及其对气候变化响应[J].*地理研究*,2020,39(5):1200-1214.
- [15] 尤南山,董金玮,肖桐,等.退耕还林还草工程对黄土高原植被总初级生产力的影响[J].*地理科学*,2020,40(2):315-323.
- [16] 郭永强,王乃江,褚晓升,等.基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J].*中国环境科学*,2019,39(11):4804-4811.
- [17] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005,26(20):4485-4498.
- [18] Peng S, Ding Y, Liu W, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. *Earth System Science Data*, 2019,11(4):1931-1946.
- [19] 孟浩斌,周启刚,李明慧,等.基于 MODIS 像元尺度的三峡库区植被覆盖度变化的地形分布特征[J].*长江流域资源与环境*,2020,29(8):1790-1799.
- [20] 马梓策,于红博,曹聪明,等.中国植被覆盖度时空特征及其影响因素分析[J].*长江流域资源与环境*,2020,29(6):1310-1321.
- [21] 俱战省,杨青森,邢培茹.1987—2015 年嘉陵江源区植被覆盖度时空变化特征[J].*地球与环境*,2020,48(4):452-460.
- [22] 龙爽,郭正飞,徐粒,等.基于 Google Earth Engine 的中国植被覆盖度时空变化特征分析[J].*遥感技术与应用*,2020,35(2):326-334.
- [23] 程志峰,何祺胜.基于 RSEI 的苏锡常城市群生态环境遥感评价[J].*遥感技术与应用*,2019,34(3):531-539.
- [24] Shahid M, Cong Z, Zhang D. Understanding the impacts of climate change and human activities on streamflow: a case study of the Soan River basin, Pakistan[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018,134(1):205-219.
- [25] Zhang L, Nan Z, Wang W, et al. Separating climate change and human contributions to variations in streamflow and its components using eight time-trend methods[J]. *Hydrological Processes*, 2019,33(3):383-394.

(下转第 241 页)

ization of the United Nations, 1998:20-21.

[13] Beguería S, Vicente-Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, kernel weighting, tools, datasets and drought monitoring [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34 (10): 3001-3023.

[14] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901—2006) of a multiscalar drought index: Comparison with current drought index datasets based on the Palmer drought severity index [J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(4):1033-1043.

[15] 黄庆忠,张强,李勤,等.基于 SPEI 的季节性干湿变化特征及成因探讨[J].自然灾害学报,2018,27(2):130-140.

[16] 冯怡,薛联青,张敏,等.基于两种 SPEI 序列的淮河流域干湿特征变化[J].水资源保护,2019,35(1):35-40.

[17] 徐泽华,韩美.山东省干旱时空分布特征及其与 ENSO 的相关性[J].中国生态农业学报,2018,26(8):1236-1248.

[18] 柴荣繁,陈海山,孙善磊.基于 SPEI 的中国干湿变化趋势归因分析[J].气象科学,2018,38(4):423-431.

[19] Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids [J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(6):693-712.

[20] Braud I, Obled C H, Phamdinhtuan A. Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis of spatial random fields: Theory, accuracy of the numerical approximations and sampling effects [J]. Stochastic Hydrology and Hydraulics, 1993, 7:146-160.

[21] 裴琳,严中伟,杨辉.400 多年来中国东部旱涝型变化与太平洋年代际振荡关系[J].科学通报,2015,60(1):97-108.

[22] 刘洁,王宁练,花婷.1960—2016 年中国北方半干旱区盛夏降水时空变化及其水汽输送特征分析[J].气候变化研究进展,2019,15(3):257-269.

[23] 李忠贤,余滔,曾刚,等.夏季大西洋 Niño 基本特征及其与中国夏季降水异常的联系[J].大气科学学报,2019,42(6):835-844.

[24] 赵峰,毕硕本,李兴宇,等.基于 EOF 和 REOF 的 1470—1911 年黄河中下游地区旱涝空间分布特征分析[J].干旱区地理,2019,42(4):799-809.

[25] Mann H B. Nonparametric test against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3):245-259.

[26] Kendall M G. Rank correlation methods [J]. British Journal of Psychology General, 1990, 12(1):86-91.

[27] Westra S, Alexander L V, Zwiers F W. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation [J]. Journal of Climate, 2013, 26(11):3904-3918.

[28] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, et al. Greening of the Earth and its drivers [J]. Nature Climate Change, 2016, 6:791-795.

[29] 国家气候中心,中国气象局预测与网络司,中国气象局兰州干旱气象研究所. GB/T 20481-2017 气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2017.

[30] 徐勇,王传胜.黄河流域生态保护和高质量发展:框架、路径与对策[J].中国科学院院刊,2020,35(7):875-883.

[31] 常军,王永光,赵宇,等.近 50 年黄河流域降水量及雨日的气候变化特征[J].高原气象,2014,33(1):43-54.



(上接第 230 页)

[26] 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.

[27] 刘旻霞,赵瑞东,邵鹏,等.近 15 a 黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析[J].干旱区地理,2018,41(1):99-108.

[28] 刘哲,邱炳文,王壮壮,等.2001—2014 年黄土高原植被覆盖状态时空演变分析[J].国土资源遥感,2017,29(1):192-198.

[29] 史晓亮,王馨爽.黄土高原草地覆盖度时空变化及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2018,25(4):189-194.

[30] 韩瑞梅,刘培,马超,等.鄂尔多斯植被的 NDVI3g 动态及气候响应[J].水土保持通报,2016,36(5):28-33,39.

[31] 张琨,吕一河,傅伯杰,等.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J].地理学报,2020,75(5):949-960.

[32] 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.

[33] 卢乔倩,江涛,柳丹丽,等.中国不同植被覆盖类型 NDVI 对气温和降水的响应特征[J].生态环境学报,2020,29(1):23-34.

[34] 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.

[35] 韩丹丹,穆兴民,高鹏,等.黄土高原地区植被变化及其对极端气候的响应[J].水土保持通报,2020,40(2):247-254.