

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.03.004

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

常 铮, 李崇贵, 张家政, 杨 丹

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为探究陕北黄土高原地区生态修复前后植被覆盖时空变化特征对区域环境的响应机制,本研究利用目前最先进的地理数据分析平台 Google Earth Engine(GEE),采用像元二分模型计算植被覆盖度(FVC),利用偏相关分析、多元回归残差分析和随机森林分类算法等方法,分析生态修复前后陕北黄土高原植被覆盖时空变化以及气候变化和人类活动对不同土地利用类型的响应机制。结果表明:1986—2019年,陕北黄土高原总体 FVC 呈现改善趋势;退耕还林前后期气温和降水与 FVC 的相关性不明显,但空间差异明显,植被生长对降水较为敏感;人类活动是影响陕北黄土高原 FVC 的主要驱动因子;在不同土地利用类型中,气候变化和人类活动对林地影响最大,对荒漠影响最小。

关键词: 陕北黄土高原; 偏相关性; 多元回归残差分析; 气候变化; 人类活动

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)03-0337-09

Analysis of vegetation changes and causes before and after ecological restoration projects on the Loess Plateau in Northern Shaanxi based on Google Earth Engine

CHANG Zheng, LI Chonggui, ZHANG Jiazheng, YANG Dan

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

Abstract: To investigate the response mechanism for spatial and temporal changes of vegetation cover characteristics to the regional environment before and after ecological restoration in the Loess Plateau region of Northern Shaanxi. The Google Earth Engine as the analysis platform is being used. The spatial and temporal change in vegetation covering the Loess Plateau of Northern Shaanxi before and after ecological restoration and the response mechanisms for climate change and human activities on different types of land use were analyzed by using the calculated fractional vegetation cover (FVC), partial correlation analysis, multiple regression residual analysis and random forest classification methods. The results show that the overall FVC of the Loess Plateau in Northern Shaanxi had an improving trend from 1986 to 2019, and that vegetation growth is more sensitive due to precipitation; human activities are the main drivers affecting FVC in the Loess Plateau of Northern Shaanxi; among the different types of land use, climate change and human activities have the greatest impact on woodlands and the least affected on deserts.

Key words: Loess Plateau in Northern Shaanxi; partial correlation; multiple regression residual analysis; climate change; human activities

为了更全面地了解黄土高原生态环境变化情况,国内外学者利用植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)对黄土高原展开了生态环境评估

工作,并运用生态指标对人类活动和自然环境进行了综合评价^[1-2]。近年来,随着生态修复工程的不断推进,黄土高原地表土地类型的变化进程不断加速。

收稿日期: 2021-08-19; 网络出版日期: 2021-12-17

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20211216.1357.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFD0600400)

第一作者: 常铮,男,硕士生,研究方向为自然环境监测与评估。E-mail: 1026591215@qq.com

通信作者: 李崇贵,男,博士,教授,硕导,研究方向为遥感定量估测。E-mail: 864958361@qq.com

已有研究表明,黄土高原地区因其特殊的地质条件以及近年来受全球气候变化的影响,水热状况均已处于临界值范畴,植被能否维持现有状况仍存在较大争议^[3]。因此,研究黄土高原植被动态变化趋势及其对气候变化和人类活动的响应,探索未来的植被动态和掌握植被变化的空间格局^[4],对生态环境脆弱地区具有深远意义。

植被覆盖度是衡量地表植被覆盖状况的重要指标^[5],引起植被覆盖度变化的主要因素是气候变化和人类活动,当前,大部分研究将降水和气温作为引起植被覆盖度变化的主要气候因子。如殷崎栋等^[6]通过分析陕西省 NDVI 的时空变化,得到了人类活动对植被覆盖度变化的影响程度。罗舒元等^[7]认为,气温对植被覆盖度的影响大于降水,且两者均存在滞后性。赵明伟等^[8]发现,2001—2015年,降水是影响西北大部分区域 FVC 动态变化的主要原因。郭力宇等^[9]研究了陕北黄土高原植被变化特征对气候因子的响应。李登科等^[10]通过研究退耕还林后植被覆盖度对气候变化的响应,认为陕西省植被覆盖度将出现下降趋势。这些研究在将植被覆盖度作为变量与气候因子进行相关分析时,多聚焦于温度和降水两个因素,没有进一步分析不同土地利用类型的响应差异;而且,在分析过程中多以全区植被覆盖度作为研究对象,忽略了植被覆盖度的空间变化。因此,有必要进一步了解区域不同土地利用类型的植被覆盖度对气候因子响应机制的差异,以便更全面地认识区域植被覆盖与气候因子的响应关系。

陕北黄土高原属于半湿润和半干旱地区,长期的乱砍、滥伐以及放牧等活动,使得该地区水土流失严重,生态环境脆弱,对气候变化极其敏感。运用遥感数据可以更加准确和便捷地分析植被覆盖变化与土地利用类型变化之间的联系,但传统研究中采用的 MODIS 和 GIMMS 植被指数产品分辨率较低,对零散分布的植被不敏感,识别效果差,而采用高分辨率的 Landsat 数据计算量大,无法实现长时序、大尺度的植被变化特征分析,而 Google Earth Engine (GEE) 平台可以在线高效处理大范围、长时间序列的遥感数据,快速实现影像统计、趋势分析,可对大区域环境下的植被变化进行实时监测。为更好地评价陕北黄土高原生态修复前后的变化特征,本研究采用 GEE 平台的 Landsat-NDVI 数据集以及气温、降水等数据,采用趋势分析、偏相关分析和多元回归残差分析等方法,探讨了陕北黄土高原实施大面积退耕还林(草)等生态修复工程前后,气候变化和人类活动对植被覆盖度的影响,结合随机森林分类法

探究了不同土地利用类型对 FVC 的响应机制,以期未来气候变化背景下陕北黄土高原的可持续发展研究提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

陕北黄土高原是中国黄土高原的核心区域,地理坐标为 $107^{\circ}15' \sim 111^{\circ}14'E$, $35^{\circ}04' \sim 39^{\circ}15'N$,总面积约 $8.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ (见图 1)。该区域昼夜温差较大、日照充足,平均海拔在 1 000 m 左右,平均气温 $8 \sim 14^{\circ}\text{C}$ ^[9]。陕北黄土高原属半干旱大陆性季风气候区,夏季多雨,冬季干燥,年均降水量约 420 mm。由于该区域人口的急剧增加,加之工业建设和放牧等因素的影响,陕北黄土高原已经成为全国水土流失较为严重的区域之一。1999年,陕北黄土高原被国家确定为退耕还林试点区域^[10],因此,本研究以 1999 年年初作为时间节点来划分研究时段。

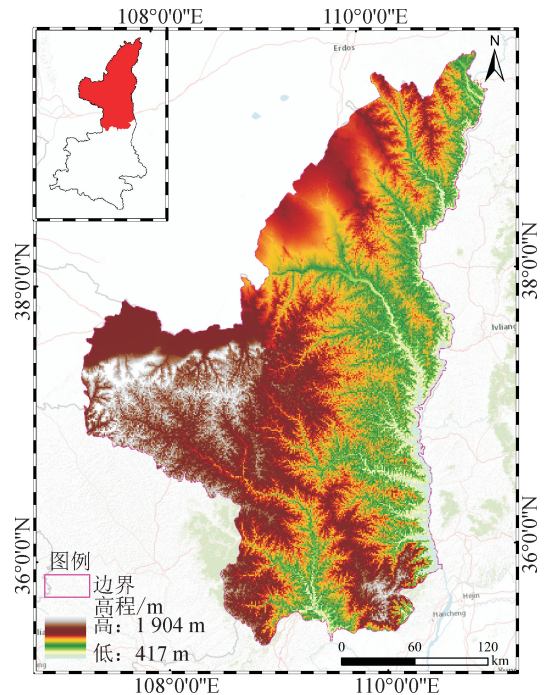


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of the study area

1.2 数据来源

Landsat-NDVI 数据集通过 GEE 平台 (<https://earthengine.google.com/>) 上 Landsat Surface Reflectance data (陆地卫星地表反射率数据) 计算得到。该数据集的空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, 已经过大气辐射校正等预处理。首先,基于空间和时间尺度在 GEE 平台上筛选出 1986—2019 年陕北黄土高原 Landsat 数据集 (Landsat 5、7 和 8 Surface Reflectance Tier1 数据); 然后,利用 QA 波段对每

一景影像进行去云掩膜处理,利用上传的陕北黄土高原行政区划图对遥感影像进行裁剪处理,并计算归一化植被指数(NDVI)。为消除云、大气和太阳高度角等因素的影响,采用最大值合成法(maximum value composition, MVC)得到年 NDVI 数据,根据像元二分模型^[11-12],计算得到陕北黄土高原植被覆盖度。以上所有工作均在 GEE 平台上完成。

气象数据来自于“国家地球系统科学数据中心”(http://www.geodata.cn/index.html),包括逐月平均温度(T_{mean})数据和逐月累积降水量(PRE)数据,其空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,选取时间为 1986—2019 年。该数据已使用 496 个气象观测点的数据进行验证,验证结果可信^[13]。因数据格式为 .nc,使用之前先利用 MATLAB 进行数据预处理,使之变成可以使用的栅格图像,最后将其合并成年尺度数据。

辅助数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/),包括 1:100 万植被类型空间分布数据,陕西省 1980 年、2000 年和 2020 年土地利用数据。

1.3 数据处理

基于像元尺度,计算 FVC 与 T_{mean} 、 PRE 之间的偏相关系数^[14],进一步分析陕北黄土高原 FVC 对气象因子的空间差异性响应结果,计算公式为:

$$R_{12,3} = \frac{R_{12} - R_{13}R_{23}}{\sqrt{(1 - R_{13}^2)(1 - R_{23}^2)}} \quad (1)$$

式中: $R_{12,3}$ 为变量 3 保持不变时,变量 1 和 2 之间的偏相关系数; R_{12} 、 R_{13} 和 R_{23} 分别为变量 1 和 2、变量 1 和 3、变量 2 和 3 之间的相关系数。

研究表明,一元线性回归模型能真实有效地反映植被的年际变化。因此,本文采用一元线性回归对 1986—2019 年陕北黄土高原每个像元的 FVC 进行趋势分析,计算公式为:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times y_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: $Slope$ 为变化趋势; n 为年序列长度; y_i 表示第 i 年的 FVC。

当 $Slope$ 值为正时,说明在 n 年内 FVC 有增加趋势,植被有改善趋势;当 $Slope$ 值为负时,则表示 FVC 有减小趋势,植被有退化趋势。

基于单个像元,采用多元回归残差分析方法建立 FVC-气候因子的理想回归方程^[15],具体步骤如

下:①建立 FVC(因变量)与 T_{mean} 和 PRE (自变量)的线性回归方程,逐像元重构 1986—2019 年仅受气候因子影响的 FVC 序列(FVC_f),并计算模型中的各项参数;②计算 FVC 观测值(FVC_p)与 FVC_f 之间的差值,即 FVC 残差(ξ),表示仅受人类活动影响的 FVC。

$$FVC_f = a \times T_{\text{mean}} + b \times PRE + c \quad (3)$$

$$\xi = FVC_p - FVC_f \quad (4)$$

式中: a 、 b 和 c 为模型参数; ξ 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。

根据陕北黄土高原实际土地覆盖类型,将区域划分为草地、耕地、荒漠、居民地、林地、水体 6 类,基于 GEE 平台完成数据质量和影像预处理,采用随机森林(random forest, RF)分类算法,结合土地利用类型数据和 Google Earth 进行分类样本选取,精选出 1 500 个分类样本,将分类样本按照 7:3 的比例进行分配,最终得到 3 期陕北黄土高原土地利用类型分类图。各期的总体分类精度分别为 70.15%、72.36%和 76.35%, $Kappa$ 系数均大于 0.65。结合 1986 年、1999 年和 2019 年土地利用类型,通过 ArcGIS 10.2 Intersect 工具,得到退耕还林前后期未发生变化的综合土地覆盖分类图。本研究关注的 FVC 涉及草地、耕地、荒漠和林地四种类型,故上述土地覆盖类型未变化区域,是分析不同土地利用类型对气候变化响应的基础。

2 结果与分析

2.1 研究区 FVC、 T_{mean} 和 PRE 的时间变化分析

为研究陕北黄土高原植被覆盖区域 FVC 随时间的变化特点,本文选取 1986—2019 年 FVC、 T_{mean} 和 PRE 的均值进行时间序列分析(见图 2)。退耕还林前期(1986—1998 年):陕北黄土高原平均年际 FVC 总体呈急剧减少趋势,其平均趋势率为 -0.0026 a^{-1} ($P < 0.01$),表明陕北黄土高原植被呈现衰退趋势;退耕还林后期(1999—2019 年):陕北黄土高原平均年际 FVC 总体呈增加趋势,其平均趋势率为 0.0048 a^{-1} ($P < 0.01$),表明陕北黄土高原植被恢复较为明显。总体来看,1986—2019 年,陕北黄土高原的平均年际 FVC 在 0.130~0.337 之间变化,最小值出现在 1990 年,最大值出现在 2018 年。FVC 总体呈现波动增长趋势,其平均趋势率为 0.003 a^{-1} ($P < 0.01$),表明陕北黄土高原植被呈现改善趋势。

年际 PRE 呈稳定上升趋势,其平均趋势率为 2.219 mm/a ($P < 0.05$),而年际 T_{mean} 呈显著增加趋势,其平均趋势率为 0.039 °C/a。此外,PRE 和

T_{mean} 的波动幅度均趋于稳定,这有助于植被覆盖区域 FVC 保持平稳。

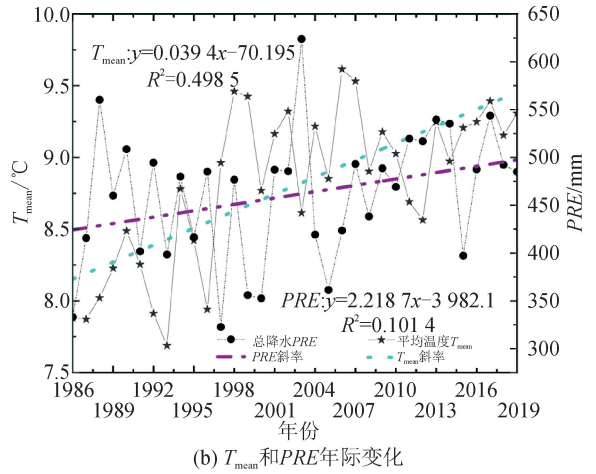
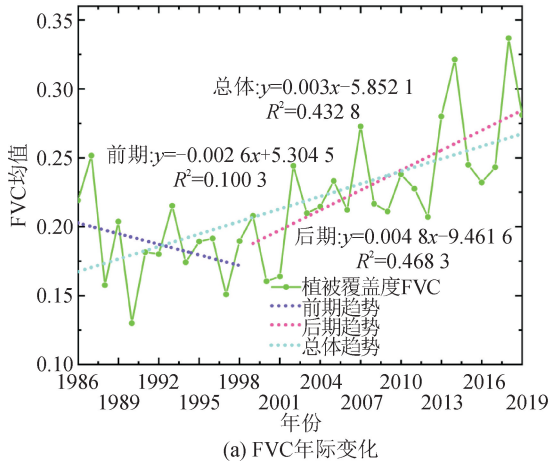


图2 1986—2019年陕北黄土高原 FVC、 T_{mean} 和 PRE 年际变化

Fig. 2 Interannual variation of FVC, T_{mean} and PRE in the Loess Plateau of Northern Shaanxi from 1986 to 2019

2.2 研究区 FVC 空间变化分析

退耕还林前后期,陕北黄土高原植被变化趋势

具有很大的空间异质性(见图3)。

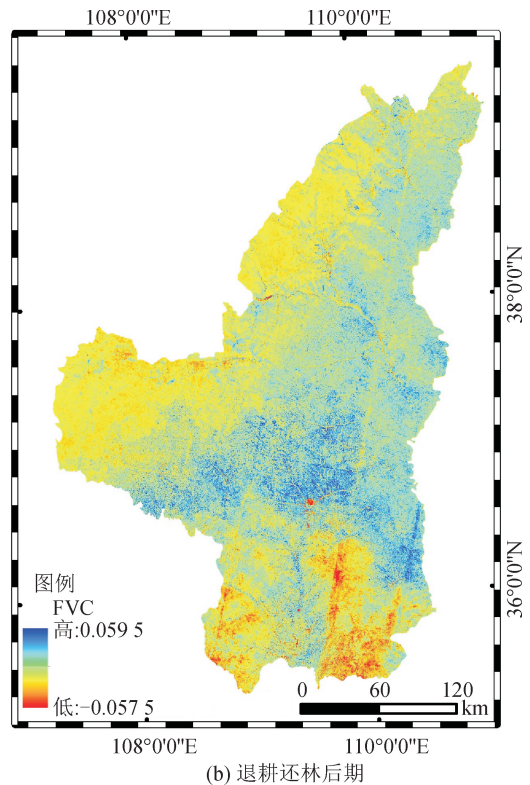
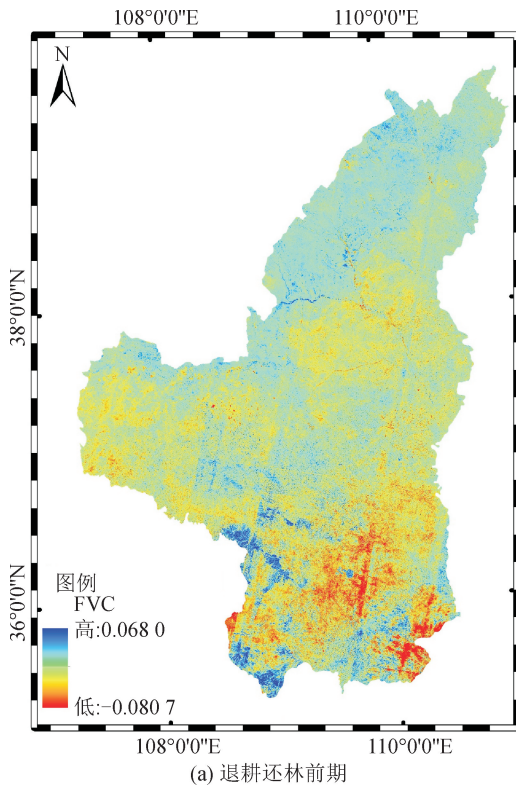


图3 1986—2019年陕北黄土高原退耕还林前后期植被变化趋势空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of vegetation change trends before and after reforestation in the Loess Plateau of Northern Shaanxi from 1986 to 2019

退耕还林前期,植被表现出北部高、南部低的特点(见图3(a)),自北向南随着人口密度的不断增加、工农业的发展^[16],其植被减少幅度逐渐增大。FVC呈减少趋势的面积占总面积的64.05%,远大

于增加趋势面积,表明植被生长状况不断衰退。植被减少区域主要集中在延安市黄龙县中南部、宜川县南部、富县西部以及宝塔区南部等地区,这些地区主要以耕地和灌草地为主,随着城市化进程的推进,

加快了植被用地向建筑用地的转换,从而加剧了植被的退化。退耕还林后期,植被表现出南北部低、中部高的特点(见图 3(b)),FVC 呈增加趋势的面积占总面积的 75.28%,远大于减少趋势面积,表明植被生长状况不断改善。植被增加区域主要集中在宜川县南部、吴起县南部、宝塔区中部等地区,这些地区的植被覆盖均有很大改善,其中宝塔区增加最为明显,其增长速率最大可达 0.0214 a^{-1} 。

2.3 不同土地利用类型对气候因子的响应机制

各土地利用类型区内, T_{mean} 和 PRE 的年际统

计量变化情况如图 4 所示,不同土地利用类型区的气候特征差异明显。从总体趋势来看,各土地利用类型区内, T_{mean} 呈现波动上升趋势,而 PRE 呈现平稳状态。耕地 T_{mean} 增加幅度最大(0.0431 a^{-1}),而 PRE 位于中等水平;林地 PRE 增加幅度最大(2.9142 a^{-1}),而 T_{mean} 位于中等水平;荒漠 T_{mean} 和 PRE 均最小。其中,林地 PRE 在 2003 年有突变,草地 PRE 在 2004 年有骤减,这可能是陕北黄土高原近年来气候暖干所致。

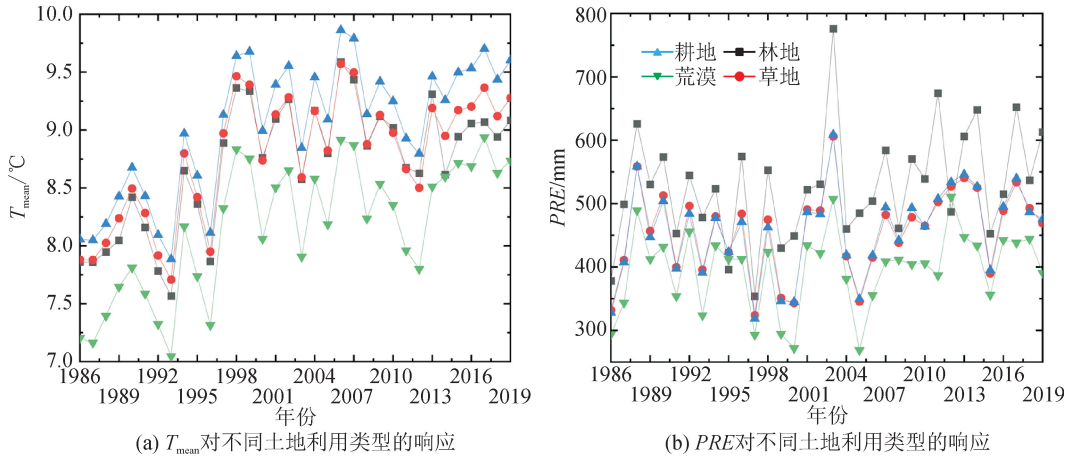


图 4 T_{mean} 和 PRE 对不同土地利用类型的响应

Fig. 4 Response of T_{mean} and PRE to different land use types

2.4 研究区 FVC、 T_{mean} 和 PRE 的相关性分析

本研究选取 T_{mean} 和 PRE 两种气象因子分析其对 FVC 变化的影响。因 T_{mean} 和 PRE 与 FVC 相关

时彼此间存在相互影响,为明确单一气象因子对 FVC 的影响状况,本文采用偏相关分析法研究 T_{mean} 和 PRE 对 FVC 的影响(见图 5)。

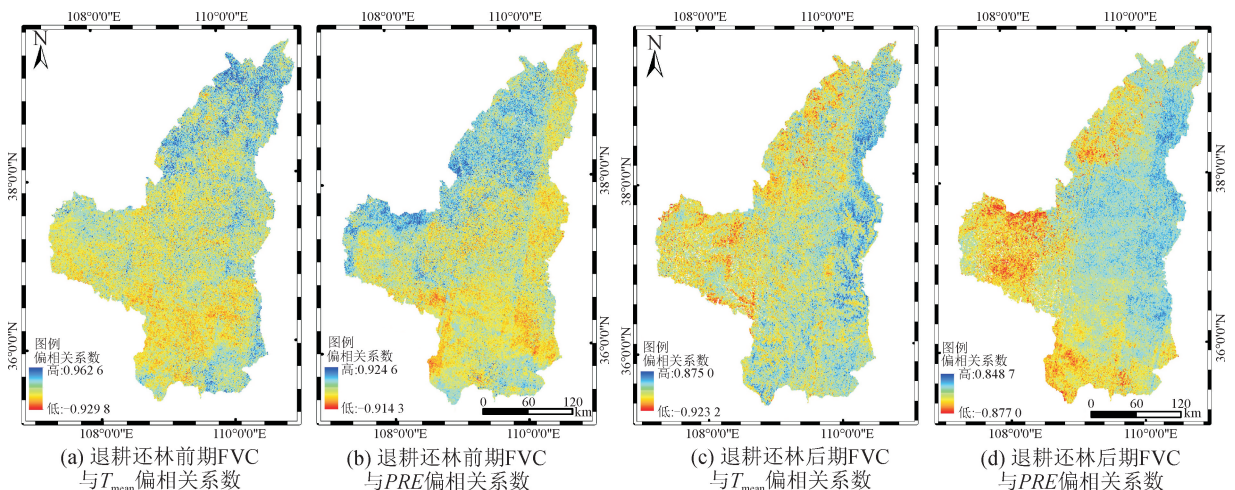


图 5 退耕还林前后期 FVC 与 T_{mean} 、 PRE 的偏相关系数

Fig. 5 Partial correlation coefficients of FVC and T_{mean} , PRE before and after reforestation

气候变化会导致植被生育期延长或缩短,因此 T_{mean} 是影响植被生长的重要因子。退耕还林前期,陕北黄土高原 FVC 与 T_{mean} 总体呈现显著负相关 ($P < 0.05$),其偏相关系数为 -0.134 。空间上,

68.90% 的区域 FVC 与 T_{mean} 呈负相关,其中 5.34% 的区域为显著性负相关,主要分布在宝塔区中南部、甘泉县中部和志丹县南部等地区。退耕还林后期,陕北黄土高原 FVC 与 T_{mean} 总体呈现显著正相关

($P < 0.01$), 其偏相关系数为 0.066 3。空间上, 60.48% 的区域 FVC 与 T_{mean} 呈正相关, 其中 3.52% 的区域为显著性正相关, 主要分布在绥德县中部、清涧县中部、佳县中南部以及神木县南部等地区。

降水是陕北黄土高原土壤水分的重要来源, 土壤水分的含量会影响植被生长, 因此, PRE 也是限制植被生长的重要因子。退耕还林前期, 陕北黄土高原 FVC 与 PRE 总体呈现显著负相关 ($P < 0.05$), 其偏相关系数为 -0.101。空间上, 64.53% 的区域 FVC 与 PRE 呈负相关, 其中 6.25% 的区域为显著性负相关, 主要分布在宜川县中部、富县西南部以及志丹县中南部等地区。退耕还林后期, 陕北

黄土高原 FVC 与 PRE 总体呈现显著正相关 ($P < 0.01$), 其偏相关系数为 0.138。空间上, 72.34% 的区域 FVC 与 PRE 呈正相关, 其中 6.19% 的区域为显著性正相关, 主要分布在佳县中南部、吴堡县中部、清涧县中部以及神木县南部等地区。

2.5 气候变化和人类活动对 FVC 影响的空间特征

本研究采用多元回归残差分析法, 利用 T_{mean} 和 PRE 数据, 逐像元拟合无人类活动干扰情况下的 FVC_t , 通过残差分析法分离出气候变化和人类活动对 FVC 的影响, 最后采用趋势分析法研究 1986—2019 年陕北黄土高原气候变化和人类活动对 FVC 的影响(见图 6)。

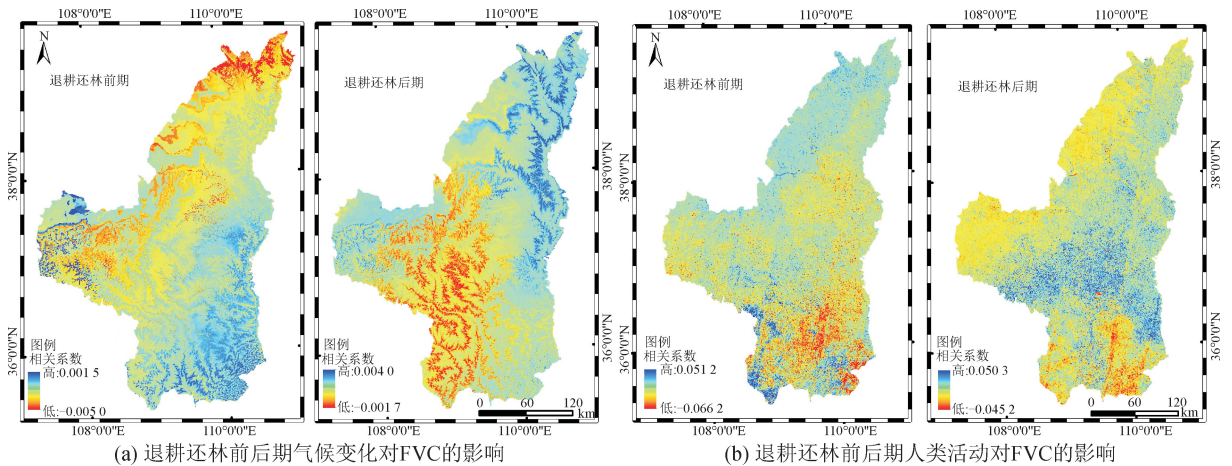


图 6 退耕还林前后气候变化和人类活动对 FVC 的影响

Fig. 6 Impacts of FVC by climate change and human activities before and after reforestation

气候变化和人类活动对陕北黄土高原 FVC 的影响存在空间上的分异性, 对于同一地区(如志丹县), 两种因子对 FVC 的影响也存在很大差异。

退耕还林前期, 气候变化对 FVC 的增加起抑制作用(平均减少趋势 $0.002 1 a^{-1}$), 且负向影响区面积占研究区总面积的 63.54%, 其中起到中度抑制和重度抑制作用的区域面积约为 7.67%, 这是由于退耕还林前, 黄土高原土壤受到剧烈侵蚀, 暴雨导致水土流失加剧所致^[17]。中度抑制和重度抑制区域主要分布在神木县中部以及府谷县南部等地区。

与气候变化类似, 退耕还林前期, 人类活动对 FVC 的增加同样起到抑制作用(平均减少趋势 $0.000 3 a^{-1}$), 且负向影响区面积占研究区总面积的 53.48%, 其中起到中度抑制和重度抑制作用的区域面积约为 3.49%, 这是由于退耕还林前, 水土流失导致粮食产量降低且十分不稳定, 产生了“越垦越穷, 越穷越垦”的恶性循环^[17]。中度抑制和重度抑制区域主要分布在宝塔区南部、延长县中部以及宜川县中南部等地区。

然而, 在退耕还林后期, 气候变化对 FVC 的增加起促进作用(平均增长趋势 $0.001 2 a^{-1}$), 且正向影响区面积占研究区总面积的 75.56%, 其中起到明显促进作用的区域面积约为 10.17%。明显促进区域主要分布在府谷县中部、神木县中西部、佳县中部等地区。

与气候变化类似, 退耕还林后期, 人类活动对 FVC 的增加同样起到促进作用(平均增长趋势 $0.003 2 a^{-1}$), 且正向影响区面积占研究区总面积的 65.08%, 这是由于这一时期退耕还林还草工程在逐步推进, 同时造沟造地工程有效增加了耕地面积, 保障了粮食安全, 促进了城镇化和新农村发展^[18]。正向影响区域主要分布在志丹县中南部、安塞县西部以及宝塔区北部等区域。

2.6 不同土地利用类型对气候变化和人类活动的响应机制

在不同土地利用类型区, 气候变化和人类活动对不同土地利用类型的作用有明显差异(见图 7)。在图 7(a)中, 气候变化对林地变化影响最大, 对荒

漠变化影响最小,影响程度由大到小依次为林地、耕地、草地、荒漠,且呈现波动上升趋势。其中,林地增加幅度最大,为 0.0030 a^{-1} ,荒漠变化幅度最小,为 -0.0008 a^{-1} ,耕地和草地增幅相似,为 0.0021 a^{-1} 。气候变化对不同土地利用类型的影响在时间上具有一致性,其波峰分别出现在 2002 年、2007 年和 2010 年,波谷分别出现在 1998 年、2005 年、2008 年、2012 年和 2015 年。在图 7(b)中,人类活动对林地变化

影响最大(0.351 a^{-1}),对荒漠变化影响最小,影响程度由大到小依次为林地、草地、耕地、荒漠。其中,2000—2003 年人类活动对土地利用影响剧烈,曲线在 2001 年出现峰值之后急剧下降,最后趋于平稳,主要原因是 2000 年开始,退耕还林还草工程进入了生物治理阶段,使得黄土高原植被覆盖度明显提升,土壤侵蚀量大幅度减少。

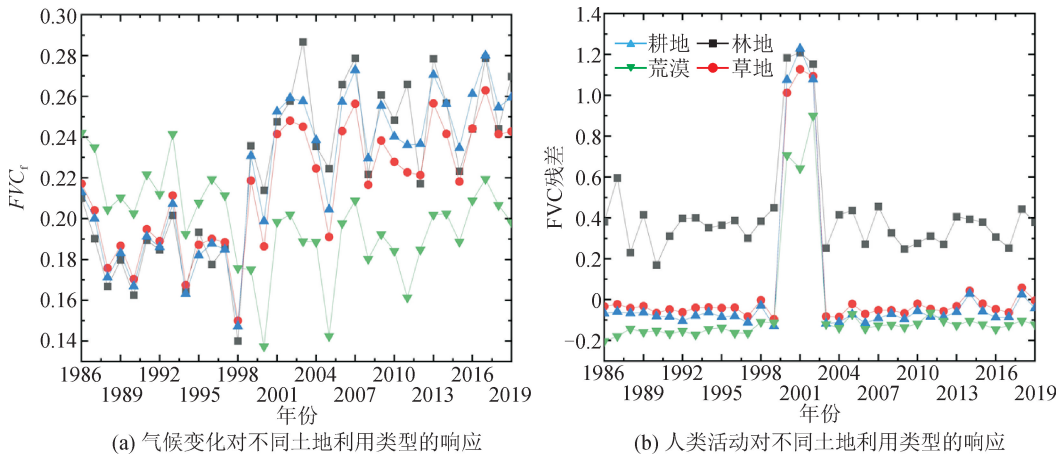


图 7 气候变化和人类活动对不同土地利用类型的影响

Fig. 7 Impacts of climate change and human activities on different land use types

3 结 论

本文研究表明,从国家大规模实施退耕还林等生态修复工程后,陕北黄土高原 FVC 总体呈现改善趋势,但空间异质性较大,李登科等^[10]也得出了类似的结果。一方面,随着经济的快速增长,城市化进程的推进,部分农田和林地转化为建筑用地,这加快了植被的退化;另一方面,近年来北方地区地表温度升高,气温的上升不仅延长了植被物候周期^[19],而且加快了土壤有机物的分解^[20],这又促进了植被生长。植被覆盖受气候因子和人类活动共同影响,随着气候变化和人类活动的不断加剧,陕北黄土高原的土地利用快速变化^[21-23]。

本研究采用 GEE 平台进行数据处理与分析。与传统的遥感图像处理软件相比,GEE 平台可以快速、大批量处理数据^[24-26],大幅提高了研究效率,且 GEE 包含常用的影像处理算法封装函数,如影像去云掩膜、裁剪和镶嵌等等,通过代码就可以实现数据的批量获取及结果的输出下载,可为今后长时序、大尺度以及海量的数据分析提供支撑。

基于 FVC 和 T_{mean} 、 PRE ,采用趋势分析、偏相关分析和多元回归残差分析等方法,结合随机森林分类算法对 1986—2019 年陕北黄土高原 FVC 变化

的驱动因子进行多尺度分析,主要结论如下。

1) 1986—2019 年,陕北黄土高原年际 FVC 呈现改善趋势,其平均趋势率为 0.003 a^{-1} ($P < 0.01$)。其中,1986—1998 年,陕北黄土高原平均年际 FVC 总体呈急剧减少趋势,其平均趋势率为 -0.0026 a^{-1} ($P < 0.01$),主要分布在延安市黄龙县中南部、宜川县南部、富县西部以及宝塔区南部等地区;1999—2019 年,陕北黄土高原平均年际 FVC 总体呈现改善趋势,其平均趋势率为 0.0048 a^{-1} ($P < 0.01$),主要分布在宜川县南部、吴起县南部、宝塔区中部等地区。

2) T_{mean} 和 PRE 对陕北黄土高原 FVC 变化存在空间差异,退耕还林前后期, T_{mean} 和 PRE 与 FVC 的偏相关系数分别为 -0.134 、 0.0663 和 -0.101 、 0.138 ,其相关性不明显,但空间差异明显,说明植被生长对降水较为敏感。

3) 气候变化和人类活动的共同作用是植被覆盖发生变化的主要原因。退耕还林前期,气候变化对 FVC 的增加起抑制作用(平均减少趋势 0.0021 a^{-1}),且负向影响区面积占研究区总面积的 63.54%;与气候变化类似,退耕还林前期,人类活动对 FVC 的增加同样起到抑制作用(平均减少趋势 0.0003 a^{-1}),且负向影响区面积占研究区总面积的 53.48%。

然而,在退耕还林后期,气候变化对 FVC 的增加起促进作用(平均增长趋势 0.0012 a^{-1}),且正向影响区面积占研究区总面积的 75.56%;与气候变化类似,退耕还林后期,人类活动对 FVC 的增加同样起到促进作用(平均增长趋势 0.0032 a^{-1}),且正向影响区面积占研究区总面积的 65.08%。在不同土地利用类型中,气候变化和人类活动对林地影响最大,对荒漠影响最小。

参考文献:

- [1] 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[J]. 生态学报,2016,36(13):3960-3968.
ZHANG Hanyu, FANG Nufang, SHI Zhihua. Spatio-temporal patterns for the NDVI and its responses to climatic factors in the Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(13):3960-3968.
- [2] 刘晓燕,刘昌明,杨胜天,等. 基于遥感的黄土高原林草植被变化对河川径流的影响分析[J]. 地理学报,2014,69(11):1595-1603.
LIU Xiaoyan, LIU Changming, YANG Shengtian, et al. Influences of shrubs-herbs-arbor vegetation coverage on the runoff based on the remote sensing data in Loess Plateau, [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(11):1595-1603.
- [3] FENG Xiaoming, FU Bojie, PIAO Shilong, et al. Re-vegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11):1019-1022.
- [4] TAI A P K, MA P H L, CHAN Y C, et al. Impacts of climate and land cover variability and trends on spring-time east Asian dust emission over 1982-2010: a modeling study [J]. Atmospheric Environment, 2021, 254:118348.
- [5] 刘焱焱,曾鹏,张然,等. 基于 GEE 和 BRT 的 1984—2019 年长三角生态绿色一体化发展示范区植被覆盖度变化[J]. 应用生态学报,2021,32(3):1033-1044.
LIU Yaoyi, ZENG Peng, ZHANG Ran, et al. Vegetation coverage change of the demonstration area of ecologically friendly development in the Yangtze River Delta, China based on GEE and BRT during 1984-2019[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3):1033-1044.
- [6] 殷崎栋,柳彩霞,田野. 基于 MODIS NDVI 数据的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响[J]. 生态学报,2021,41(4):1571-1582.
YIN Qidong, LIU Caixia, TIAN Ye. Spatio-temporal greenness and anthropogenic analysis in Shaanxi based on MODIS NDVI from 2001 to 2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4):1571-1582.
- [7] 罗舒元,朱清科,辛云玲,等. 陕北吴起县植被覆盖度时空特征及其影响机制 [J]. 中国水土保持科学,2020,18(3):146-154.
LUO Shuyuan, ZHU Qingke, XIN Yunling, et al. Spatio-temporal characteristics of vegetation coverage and its influencing mechanism in Wuqi county, northern Shaanxi province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(3):146-154.
- [8] 赵明伟,王妮,施慧慧,等. 2001—2015 年间我国陆地植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J]. 干旱区地理,2019,42(2):324-331.
ZHAO Mingwei, WANG Ni, SHI Huihui, et al. Spatial-temporal variation and its driving forces of vegetation coverage in China from 2001 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2):324-331.
- [9] 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.
- [10] 李登科,王钊. 退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J]. 生态学杂志,2020,39(1):1-10.
LI Dengke, WANG Zhao. Changes of fractional vegetation coverage after returning farmland to forests and its response to climate in Shaanxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1):1-10.
- [11] 何云玲,余岚,屈新星,等. 云南喀斯特关键带植被时空变化特征及气候与人为影响因子解析[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(2):439-447.
HE Yunling, YU Lan, QU Xinxing, et al. Spatio-temporal variations of vegetation coverage and its climatic and human factors analysis in the karst critical zone of southeast Yunnan[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(2):439-447.
- [12] 王国芳,毕如田,张吴平,等. 典型矿区植被覆盖度时空分布特征及影响因素[J]. 生态学报,2020,40(17):6046-6056.
WANG Guofang, BI Rutian, ZHANG Wuping, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and influencing factors of vegetation coverage in typical mining areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17):6046-6056.
- [13] PENG Shouzhong, DING Demi, LIU Wenzhao, 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.
- [14] 杜佳梦,包刚,佟斯琴,等. 1982—2015 年蒙古国植被覆盖变化及其与气候变化和人类活动的关系[J]. 草业学报,2021,30(2):1-13.
- DU Jiameng, BAO Gang, TONG Siqin, et al. Variations in vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Mongolia during the period 1982-2015[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(2): 1-13.
- [15] 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.
- [16] 邓元杰,侯孟阳,谢怡凡,等. 退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务价值时空演变的影响[J]. 生态学报,2020,40(18):6597-6612.
- DENG Yuanjie, HOU Mengyang, XIE Yifan, et al. Impact of the Grain for Green Project on the temporal and spatial evolution of ecosystem service value in northern Shaanxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6597-6612.
- [17] 李相儒,金钊,张信宝,等. 黄土高原近 60 年生态治理分析及未来发展建议[J]. 地球环境学报,2015,6(4): 248-254.
- LI Xiangru, JIN Zhao, ZHANG Xinbao, et al. Analysis of ecosystem management of the Loess Plateau during the past 60 years and suggestions for the future development[J]. Journal of Earth Environment, 2015, 6(4): 248-254.
- [18] LIU Qiang, WANG Yunqiang, ZHANG Jing, et al. Filling gullies to create farmland on the Loess Plateau [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(14): 7589-7590.
- [19] LI C, WANG R, CUI X, et al. Responses of vegetation spring phenology to climatic factors in Xinjiang, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107286.
- [20] 孙晓丹,叶钰倩,王刚,等. 有机物覆盖的土壤环境效应作用机制研究现状与展望[J]. 林业科学,2020,56(6):103-112.
- SUN Xiaodan, YE Yuqian, WANG Gang, et al. Current status and prospects of impacts of organic mulching on soil conditions [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(6): 103-112.
- [21] 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.
- [22] QU Lulu, LIU Yansui, CHEN Zongfeng. Spatio-temporal evolution of ecologically-sustainable land use in China's Loess Plateau and detection of its influencing factors[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(5): 1065-1074.
- [23] SI J, NASIRI F, HAN P, et al. Variation in ecosystem service values in response to land use changes in Zhifanggou watershed of Loess Plateau: a comparative study[J]. Environmental Systems Research, 2014, 3(1): 1-10.
- [24] HUANG Huiping, CHEN Wei, ZHANG Yuan, et al. Analysis of ecological quality in Lhasa Metropolitan Area during 1990 - 2017 based on remote sensing and Google Earth Engine platform[J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(2): 265-280.
- [25] 刘垚燧,田恬,曾鹏,等. 基于 Google Earth Engine 平台的 1984—2018 年太湖水域变化特征[J]. 应用生态学报,2020,31(9):3163-3172.
- LIU Yaoyi, TIAN Tian, ZENG Pen, et al. Surface water change characteristics of Taihu Lake from 1984-2018 based on Google Earth Engine[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 3163-3172.
- [26] 胡克宏,张震,郜敏,等. 中国丝绸之路经济带沿线植被覆盖变化及自然影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2020,36(17):149-157.
- HU Kehong, ZHANG Zhen, GAO Min, et al. Variations in vegetation cover and natural factors of provinces in China along Silk Road Economic Belt during 2000-2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(17): 148-157.

(责任编辑 周 蓓)