

DOI: 10.20103/j.stxb.202208142316

韩磊, 曹鑫鑫, 朱会利, 陈芮, 赵永华, 刘钊, 赵子林, 常钰卿, 杨梅丽, 高毅丰. 基于特征分区的陕北黄土高原植被覆盖变化及其驱动因素. 生态学报, 2023, 43(20): 8564-8577.

Han L, Cao X X, Zhu H L, Chen R, Zhao Y H, Liu Z, Zhao Z L, Chang Y Q, Yang M L, Gao Y F. Change of vegetation coverage and driving factor in the North Shaanxi Loess Plateau based on characteristic zoning. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8564-8577.

基于特征分区的陕北黄土高原植被覆盖变化及其驱动因素

韩磊^{1,2,3,*}, 曹鑫鑫⁴, 朱会利⁵, 陈芮⁴, 赵永华¹, 刘钊¹, 赵子林⁴, 常钰卿⁴, 杨梅丽⁴, 高毅丰⁴

1 长安大学土地工程学院, 西安 710054

2 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

3 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710054

4 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054

5 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054

摘要: 陕北黄土高原是退耕还林(草)工程的重要实施区域, 深入分析退耕以来不同时间段的植被覆盖变化和驱动因素特征, 对推进区域生态环境建设具有重要指导意义。基于 2000—2019 年中分辨率成像光谱仪(MODIS)获取的归一化植被指数(NDVI)数据, 在地理分区的基础上, 根据气候和植被覆盖类型等自然地理要素对陕北黄土高原进行特征区域划分, 采用趋势分析、相关分析和残差分析等方法, 研究全域及各分区在两轮退耕还林(草)工程实施期间(2000—2013 年、2014—2019 年)植被覆盖的时空变化及其驱动因素, 探究不同时期植被变化及驱动因素的差异性。结果表明:(1)2000—2019 年, 各分区年均 NDVI 值为土石丘陵林区(Ⅵ区)>黄土塬区(Ⅶ区)>黄土梁状丘陵区(Ⅴ区)>黄土峁状丘陵区(Ⅳ区)>盖沙黄土丘陵区(Ⅱ区)>黄土宽谷丘陵区(Ⅲ区)>风沙丘陵区(Ⅰ区), 均呈增加趋势。(2)20 年间, 研究区植被显著改善面积占比约为 93.6%。在第二轮工程实施期间, 研究区植被改善速度较第一轮降低(0.0136/a、0.0125/a), Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ区部分植被发生退化。(3)陕北地区植被变化是气候和人类活动共同作用的结果。人类活动是引起研究区植被变化的主导因素, 但气候因素在植被变化中的影响程度逐渐加深。气候因素在第二轮工程实施期间对各分区植被变化的贡献率较第一轮增大。(4)在长时间尺度上, 植被的生长和分布受水分等自然条件的制约。因此, 在进行植被恢复时, 要充分考虑自然环境条件, 以达到区域生态恢复的可持续性。

关键词: 植被覆盖; 特征分区; 驱动因素; 陕北黄土高原

Change of vegetation coverage and driving factor in the North Shaanxi Loess Plateau based on characteristic zoning

HAN Lei^{1,2,3,*}, CAO Xinxin⁴, ZHU Huili⁵, CHEN Rui⁴, ZHAO Yonghua¹, LIU Zhao¹, ZHAO Zilin⁴, CHANG Yuqing⁴, YANG Meili⁴, GAO Yifeng⁴

1 School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

3 Shaanxi Key Laboratory of Land consolidation, Xi'an 710054, China

4 School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

5 School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871190); 陕西省重点研发计划项目(2021SF-440); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(SKLLQG2002)

收稿日期: 2022-08-14; **采用日期:** 2023-01-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hanshuanglei@chd.edu.cn,

Abstract: The North Shaanxi Loess Plateau is the key area for implementing the Grain for Green Project (GFGP). An in-depth analysis of vegetation cover changes and driving factors in different periods since the de-farming in the North Shaanxi Loess Plateau has important guiding significance for promoting the regionally ecological environment construction. Although a large number of studies have been carried out on vegetation cover change in the North Shaanxi Loess Plateau, the researches mainly focus on the comparison of vegetation characteristics before and after the GFGP. In addition, relevant studies are mainly limited to administrative boundaries, vegetation zoning and other scales, ignoring the relationship between naturally geographical elements and vegetation-climate-human activities. In this paper, the North Shaanxi Loess Plateau was divided into the feature zones according to the climate, vegetation cover types and other naturally geographical elements on the basis of geographical division. Based on normalized difference vegetation index (NDVI) extracted from the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) images data from 2000 to 2019, trend analysis, correlation analysis and residual analysis were used to study the spatial and temporal changes of vegetation coverage and its driving factors during the implementation of the two rounds of the GFGP (2000—2013, 2014—2019) in the North Shaanxi Loess Plateau, and to explore the differences of vegetation changes and driving factors in different periods. The results showed as follows: (1) From 2000 to 2019, each zone had an increasing trend in Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The decreasing order of the means of NDVI of the different zones was as follows: Earth-rock hilly forest area (VI zone) > Loess tableland (VII zone) > Loess-gullied area (V zone) > The hilly-gully regions of Loess Plateau (IV zone) > Cover sand yellow hilly area (II zone) > Loess wide valley hilly area (III zone) > Wind-sand hilly area (I zone). (2) During the past 20 years, the percentage of the North Shaanxi Loess Plateau with significantly improved vegetation was approximately 93.6%. During the implementation of second round of the GFGP, part vegetation in the IV, V, VI, VII areas was degraded, and the vegetation improvement rate of the North Shaanxi Loess Plateau was 0.0125/a, which was lower than 0.0136/a in the first round of the project. (3) The vegetation change in the North Shaanxi Loess Plateau was the result of the combined action of climate changes and human activities. Human activity was the dominant factor causing vegetation change in the North Shaanxi Loess Plateau, while climatic factors were becoming more influential in vegetation change. The contribution rate of climate factors to vegetation change in each subzone during the implementation of second round of the GFGP was higher than that in the first round of the project. (4) On long time scales, the growth and distribution of vegetation were restricted by natural conditions such as moisture. Therefore, natural environment conditions should be considered in the process of vegetation restoration to achieve the sustainability of regional ecological restoration.

Key Words: vegetation cover; characteristics-based zoning; driving factor; North Shaanxi Loess Plateau

植被是生态系统的主体和存在基础。在全球气候变化的背景下,陆地地表植被覆盖变化会对区域生态平衡和局地气候变化产生直接或间接的影响,是全球气候变化的指示器^[1-3]。陕北黄土高原地表疏松、沟多坡陡、地形起伏破碎、降雨多以暴雨形式出现,受该区域特有的地理因素和人为因素的影响,生态环境状况严峻^[4-5],植被建设是黄土高原生态恢复的重要举措^[6]。1999年以来已在该区域开展了两轮退耕还林(草)工程,工程部署面积与力度均超过高原平均水平^[7]。退耕还林(草)工程的实施显著增加了陕北黄土高原植被覆盖面积,有效改善了当地生态环境^[8-9]。但由于近年来气候变化明显、人为扰动频繁,导致该地区植被仍波动显著,进而影响生态系统的稳定性^[10]。因此,深入探讨陕北地区植被变化特征和驱动因素,对陕北乃至黄土高原地区植被恢复和生态环境修复具有重要意义。

植被覆盖变化一直是生态脆弱区地表景观研究的热点^[11-13]。已有学者从全区或植被分区尺度出发,围绕黄土高原植被覆盖变化及驱动因素展开了大量研究^[14-17]。目前普遍认为植被覆盖变化是气候变化与人类活动共同作用的结果,植被生长在区域大尺度上主要受气候变化的影响,人类活动对植被的影响主要体现在区域小尺度^[18-20]。陕北黄土高原植被分布因自然条件的不同产生空间差异。从现有研究来看,对于植被覆

盖变化特征,学者们多集中于行政界线^[16,21]、植被分区^[15,22]等尺度的研究,但对于地理分区和地表覆盖尺度下的植被变化涉及较少,忽视了自然地理要素与植被-气候-人类活动之间的关系。此外,因已有的生态环境和经济社会环境的不同,两轮工程实施的重点及措施有很大的差异。而在当前的研究中,大多局限于对比分析退耕还林(草)工程实施前后黄土高原的植被变化^[23-24],对两轮工程实施期间植被变化和驱动力因素差异性的研究较少。通过对比分析两轮工程实施期间植被变化和驱动力因素差异性,不仅可以探讨两轮工程实施期间陕北黄土高原自然环境的反馈和正负效应,深入认识该区生态环境演变,还能为以后退耕还林(草)工程的实施提供有效的基础数据,促进植被恢复政策更加科学和完善。

因此,本文基于 2000—2019 年中分辨率成像光谱仪(MODIS)获取的归一化植被指数(NDVI)数据,根据地形、降水等自然条件进行特征分区,利用趋势分析和残差分析等方法,探讨两轮工程实施期间全区及各分区 NDVI 的时空变化及其与气候和人类活动的响应关系。

1 研究区概况

陕北地区位于黄土高原腹地(34°49′—39°35′N,107°10′—111°14′E),包括榆林、延安 2 个地级市,年均气温 8—12℃,年降水量从南至北 350—650mm,海拔高度约 500—2000m,地势西北高东南低(图 1)。气候上处于暖温带大陆性季风半湿润性气候向温带半干旱气候过渡带。研究区境内沟壑纵横,地形复杂,降水和气温空间分布差异明显,植被类型多样。因植被、地形、土壤等自然原因以及过度放牧、滥砍滥伐等人为原因,导致陕北黄土高原产生水土流失、土地沙漠化等生态问题,使得该地区成为世界上生态环境退化最严重的地区之一^[25]。

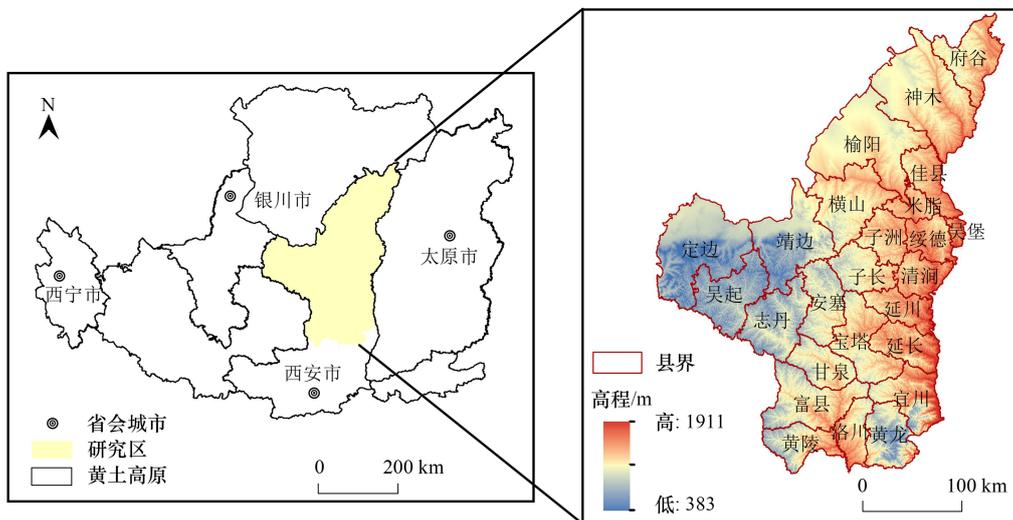


图 1 陕北黄土高原地形图

Fig.1 Topographic map of the North Shaanxi Loess Plateau

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 植被遥感数据

归一化植被指数(NDVI)是目前最为常用的表征地表植被生长特征的指标^[26-27],在一定程度上可以客观反映植被覆盖状况^[28-30]。本文所使用的是 MODIS NDVI 数据,来源于美国国家航天局网站,空间分辨率为 250m,时间分辨率为 16d,时间范围为 2000 年 2 月—2019 年 12 月。为有效去除云、大气和太阳高度角等产生的影响^[31],采用最大值合成法获取 2000—2019 年年最大 NDVI 数据(年 NDVI_{max})。

2.1.2 气象及土壤水分数据

降水及气温数据来自国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpsc.ac.cn>), 空间分辨率为 1km。日照时数数据来自中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/>), 包括研究区及其周边地区 47 个气象站 2000—2019 年的逐日气象数据, 通过插值获得其空间分布。地表土壤水分(0—10cm)和根区土壤水分(10—250cm)均采用(GLEAM)3.0a 版本数据, 空间分辨率为 10km。为使其与 NDVI 分辨率一致, 采用 ArcGIS 重采样方式将气象及土壤水分数据分辨率采样为 250m。

2.1.3 分区数据

地理分区数据来源于国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心-黄土高原分中心 (<http://loess.geodata.cn>)。基于地形地貌, 将陕北黄土高原区划分为风沙丘陵、盖沙黄土丘陵、黄土崩状丘陵、黄土梁状丘陵、黄土宽谷丘陵、土石丘陵和黄土塬 7 大类。土地利用/覆被数据来源于中国科学院资源环境数据中心, 空间分辨率为 1km。数字高程模型 (DEM) 数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>) 的星载热反射和反射辐射仪全球数字高程模型数据产品 (ASTER GDEM) 数据产品, 空间分辨率为 30m。为使其与 NDVI 分辨率一致, 故采用 ArcGIS 重采样方式将其分辨率采样为 250m。利用 ArcGIS 对黄土高原地理分区、土地利用及地形图进行投影转换, 提取研究区域。基于七大地理分区, 遵循区域划分原则, 依据降水、植被类型及年均植被指数的区域性特征及差异, 在 ArcMap 中对其进行合并, 划分特征区域。

2.2 研究方法

2.2.1 线性趋势分析

使用最小二乘法计算年 NDVI_{max} 及气候因子的变化趋势, 斜率 (Slope) 为年际变化趋势率^[32]。

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

式中, i 为时间变量, 取值范围为 1 到 n 的整数; n 为 20; y_i 为第 i 年变量 i 的值。对变化趋势采用 F 检验判断其显著性^[15]。

2.2.2 相关分析

相关系数 (R) 的计算如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中, x_i, y_i 为两个要素样本的第 i 个值; \bar{x}, \bar{y} 为两个要素样本的平均值; R 为 x 与 y 之间的相关系数^[16]。

2.2.3 残差分析

本文以年 NDVI_{max} 为自变量、同期气候因子为因变量建立回归模型, 计算出 NDVI 真实值和预测值 (NDVI_{CC}) 之间的差值, 即 NDVI 残差 (NDVI_{HA}), 用来表示人类活动对于 NDVI 的影响^[33—34]。NDVI 预测值 (NDVI_{CC}) 表示气候因素对于 NDVI 的影响。

$$\text{NDVI}_{\text{HA}} = \text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{CC}} \quad (3)$$

$$\text{NDVI}_{\text{CC}} = a \times P + b \times T + c \quad (4)$$

式中, a, b, c 为常数; P 为年降水量, 单位为 mm; T 为年均气温, 单位为 °C。

NDVI_{CC} 和 NDVI_{HA} 的线性趋势率分别表示气候变化和人类活动对 NDVI 变化的贡献。正值表示促进 NDVI 增加, 反之为抑制。参考相关研究成果^[35—37], 将 NDVI_{CC} 和 NDVI_{HA} 变化趋势率划分为 7 个等级: 明显抑制、中度抑制、轻微抑制、基本无影响、轻微促进、中度促进和明显促进 (表 1)。

表 1 气候变化和人类活动对 NDVI 的影响分级 ($10^{-2} a^{-1}$)

Table 1 Classification of the impacts of climatic change and human activities on NDVI

趋势 (NDVI) ^a Slope(NDVI) ^a	影响程度 Degree of influence	趋势 (NDVI) ^a Slope(NDVI) ^a	影响程度 Degree of influence
<-2.0	明显抑制	0.2—1.0	轻微促进
-2.0—-1.0	中度抑制	1.0—2.0	中度促进
-1.0—-0.2	轻微抑制	≥2.0	明显促进
-0.2—0.2	基本无影响		

NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; 趋势 (NDVI)^a 表示在气候变化影响下的 NDVI 的变化趋势 (Slope(NDVI_{CC})) 或人类活动影响下的 NDVI 的变化趋势 (Slope(NDVI_{HA}))

3 研究结果与分析

3.1 NDVI 空间分布状况

基于陕北地区年最大 NDVI 影像数据, 计算 2000—2019 年的年 NDVI_{max}, 并进行 5 等分分级处理, 获得植被覆盖分级图 (图 2)。由图 2 可知, 2000—2019 年陕北黄土高原植被覆盖总体上呈现出南高北低的空间分布格局。植被覆盖高 (NDVI>0.8) 的区域主要位于延安市的富县、黄龙县和黄陵县, 土地覆被类型为林地, 植被生长密集。中高度植被覆盖区 (0.6—0.8) 主要分布于子午岭和黄龙山之间的北洛河流域, 土地覆被类型主要为有林草地。中度植被覆盖区土地利用类型为坡耕地和草地, 主要分布于榆林市东部及南部地区。中低度植被覆盖区 (0.2—0.4) 主要位于长城以北的风沙区, 土地覆被类型为以草地和灌木为主。低度植被覆盖区 (NDVI<0.2) 主要分布于榆林市西北部毛乌素沙地, 降水稀少, 植被稀疏。

3.2 NDVI 和气候因素的变化趋势及相互关系

由图 3 所示, 陕北地区年 NDVI_{max} 减少幅度为 -0.048—0/a, 增加幅度为 0—0.043/a, 年均增长率为 0.0103/a, 整体上呈明显改善趋势。其中, 极显著增加区域 ($P<0.01$) 所占面积比为 88.08%, 显著增加区域 ($P<0.05$) 面积比为 5.52% (图 4)。研究区大部分区域年降水量和年均气温均无显著性变化。降水呈增加趋势的区域主要分布在榆林市的神木、佳县、榆阳等地, 占整个陕北地区的 23.23%, 增加幅度在 0—10.328mm/a 之间。年均气温呈增加趋势的区域零散分布在榆林市东北部及西部地区, 占整个研究区的 0.72%, 增加幅度为 0—0.039℃/a。年均日照时数呈减少趋势的区域面积占比为 23.32%, 主要分布于延安市南部; 增加区域面积占比为 7.96%, 主要分布于榆林市东北部。

在全区范围内对植被年最大 NDVI 和各气候因素做相关分析可知, 年 NDVI_{max} 与年降水量的相关系数为 0.32, 与年均气温、日照时数的相关系数分别为 -0.12、-0.05, 相关性均不显著。这与刘静、张含玉等的研究结果相符^[15,38]。受生态工程的影响, 研究区大部分植被为人工植被, 植被覆盖度的变化很大程度受植被种植密度、生长年限及生物种的影响, 人类植被恢复活动会掩盖气候变化和植被之间的作用。此外, 因自然环境条件不同, 研究区植被类型在空间分布上存在很大差异性。研究表明, 气候对不同植被类型产生不同的影响^[15]。因此, 在全区范围内研究气候与植被之间的关系不仅会忽视植被类型对气候变化的响应差异, 而且掩盖了植被-气候-人类活动之间的关系。

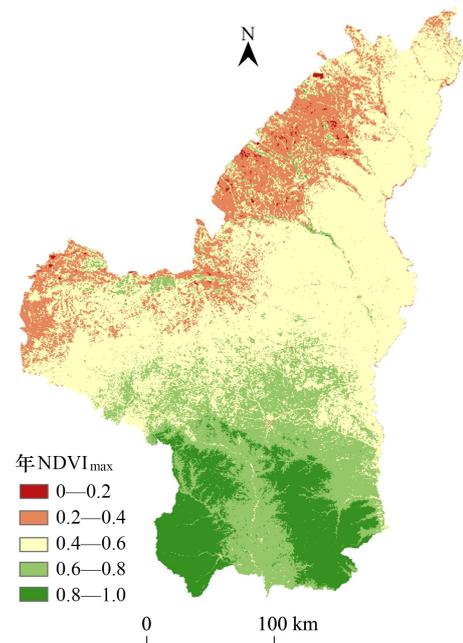


图 2 多年平均年最大 NDVI 空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual mean maximum NDVI

NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; 年 NDVI_{max}: 年最大归一化植被指数 Annual maximum normalized difference vegetation index

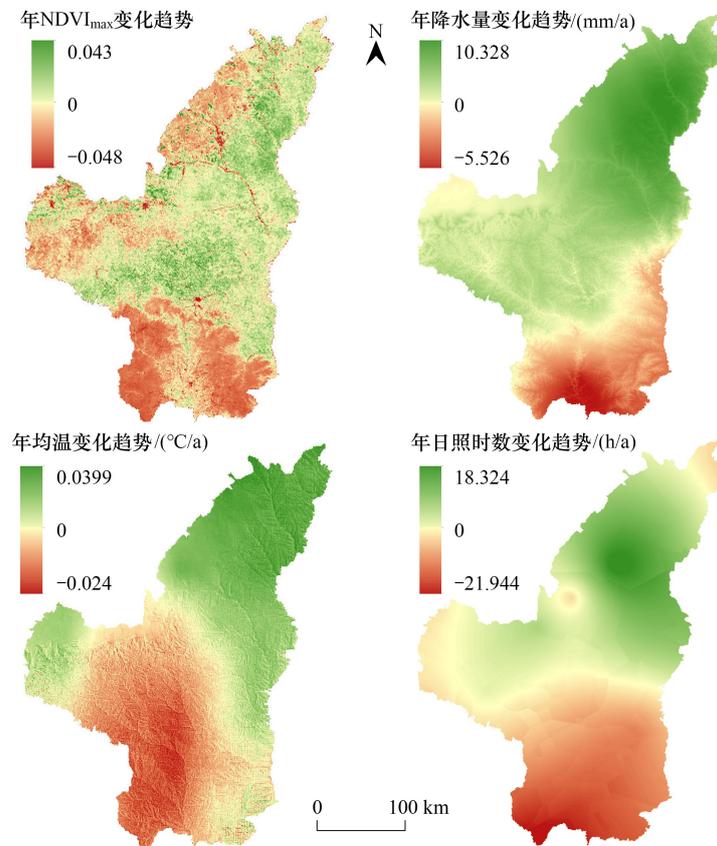


图3 2000—2019年陕北黄土高原NDVI及气候因子变化趋势

Fig.3 Trends of vegetation NDVI and climatic factors in the North Shaanxi Loess Plateau from 2000 to 2019

3.3 各分区 NDVI 动态变化

3.3.1 特征分区

陕北黄土高原地貌类型多样、地面起伏较大,降水分布不平衡,自然地理条件复杂,空间组合变化明显,这样的地域差异决定了植被类型多样。不同环境也决定了不同的退耕还林模式。基于中国科学院水利部水土保持研究所提出的地理分区,陕北黄土高原可划分风沙丘陵、盖沙黄土丘陵、黄土崩状丘陵、黄土梁状丘陵、黄土宽谷丘陵、土石丘陵和黄土塬7大区域。结合陕北黄土高原土地覆盖与年均NDVI数据,可以发现陕北地区整体上呈现由西北到东南从裸地景观,到荒漠草地景观、草地景观,再到森林景观的分布格局,植被覆盖逐渐增大。降水也呈现出由西北到东南逐渐增大的分布格局。通过综合分析发现,位于延长县的黄土塬区与黄土梁状地区的植被覆盖类型、植被覆盖度及年降水量等气候条件较为接近,而与位于黄陵、洛川和富县的黄土塬区的植被生长状态及气候条件差异性较大,因此将位于延长县的黄土塬区归入到黄土梁状丘陵区。其他地理分区则呈现出与研究区地形特点、植被变化、气候特征等相适应的格局分布。陕北黄土高原特征分区布局如图5所示。

由表2可知,风沙丘陵区(I区)位于长城以北毛乌素沙漠南缘地区,地势平坦,年降水量小于450mm,日照时数大,气候条件恶劣,植被覆盖度最低,主要土地利用类型为沙地。盖沙黄土丘陵区(II区)介于风沙丘和黄土崩之间,地势起伏较小,土地利用类型以草地与旱地为主。黄土宽谷丘陵区(III区)气温高于I区和II区,年降水量低于II区,地面平均高程最大,地形起伏较大,土地利用类型以草地为主,植被覆盖度较低。黄土崩状丘陵区(IV区)境内有窟野河、无定河穿过,土地利用类型以旱地为主,气候条件较差,地势起伏较大。黄土梁状丘陵区(V区)主要土地利用类型为中覆盖度草地与旱地,气候条件一般,地势起伏最大,中部有延河穿过。土石丘陵林区(VI区)年降水量大于600mm,土地覆被类型为针阔叶混交林,植被覆盖度最高,是人工

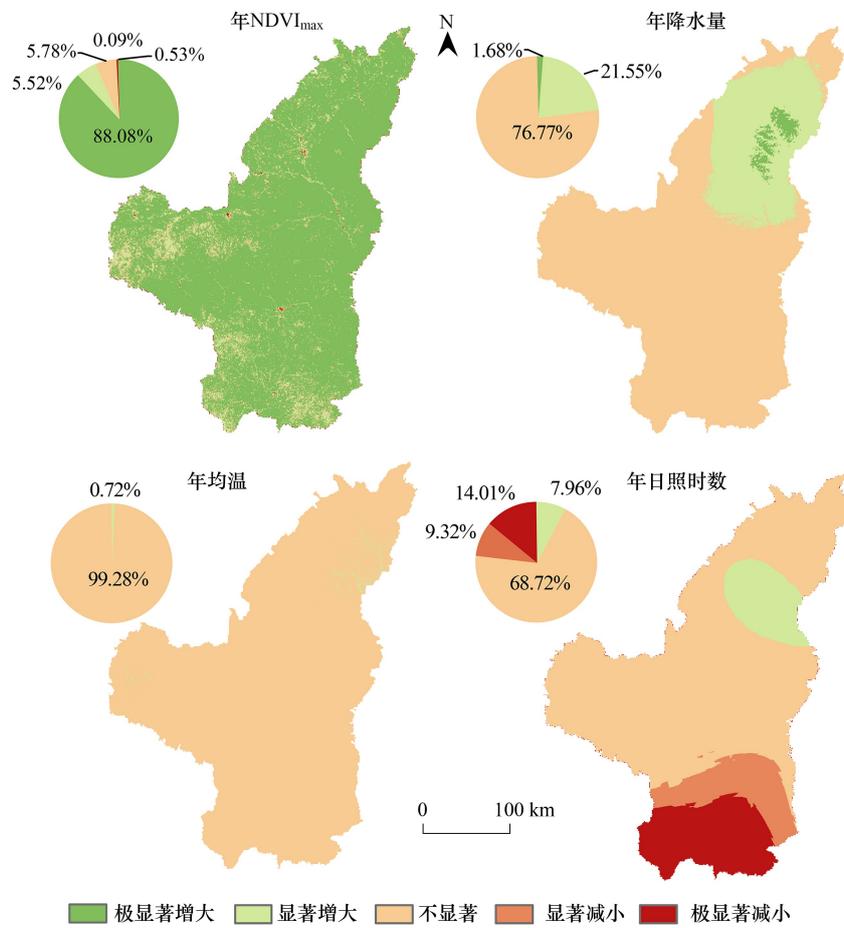


图 4 变化趋势显著性等级及其比例
Fig.4 Significance and proportions of the change trend

表 2 陕北黄土高原各分区的自然特征

Table 2 Natural characteristics of the each zone of the North Shaanxi Loess Plateau

分区 Zones	主要土地利用类型 Major land use types	年均 NDVI Mean annual NDVI	地形起伏度 Relief/m	年均降水量 Mean annual precipitation/mm	年均气温 Mean annual temperature/°C	年均日照时数 Mean annual sunshine hours/h
I 风沙丘陵区 Wind-sand hilly area	沙地	0.38	30.87	437.37	9.68	2966.09
II 盖沙黄土丘陵区 Cover sand yellow hilly area	旱地、 低覆盖度草地	0.47	85.29	475.84	9.70	2872.75
III 黄土宽谷丘陵 Loess wide valley hilly area	低覆盖度草地 中覆盖度草地	0.45	91.75	446.25	9.97	2901.86
IV 黄土崩状丘陵 The hilly-gully regions of Loess Plateau	旱地	0.53	109.95	510.72	10.19	2780.41
V 黄土梁状丘陵 Loess-gullied area	旱地、 中覆盖度草地	0.60	134.54	535.83	10.49	2722.23
VI 土石丘陵林区 Earth-rock hilly forest area	林地	0.80	127.52	613.77	11.38	2618.92
VII 黄土塬 Loess tableland	林地	0.74	105.11	620.93	11.81	2615.55

林地潜力区。黄土塬区(Ⅶ区)位于黄龙山和子午岭之间,中间有北洛河穿过,气候条件一般,土地覆被类型为有林草地。结合图 5 和表 2 可知,陕北地区由北向南降水和气温依次升高,植被覆盖也依次增大;地形起伏大的地区植被覆盖大。因此,地形地貌和水热条件从宏观上决定了陕北黄土高原的植被覆盖类型,并且影响植被的疏密程度。

3.3.2 各分区植被覆盖变化趋势及对气候的响应

对各分区年 $NDVI_{max}$ 分析可知,不同区域 $NDVI$ 增长幅度均不同。20 年间,以耕地为主的Ⅳ区和Ⅴ区年 $NDVI_{max}$ 增长幅度最快,分别为 0.0138/a 和 0.0132/a (表 3)。主要是因为,在退耕还林(草)工程的实施下,大面积的土地退耕使林草植被得到恢复。植被覆盖度最低的Ⅰ区 $NDVI$ 增长速度较快,为 0.0102/a。以草地为主的Ⅱ区和Ⅲ区均处于风沙过渡区,对外部环境变化敏感,生态系统不稳定, $NDVI$ 呈现波动上升趋势。Ⅵ区和Ⅶ区以林地为主,生态系统稳定, $NDVI$ 增长趋势最缓,分别为 0.0055/a 和 0.0072/a。

由表 3 可知,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区的 $NDVI$ 在第一轮退耕工程实施期间的增长率(0.0111/a、0.0171/a、0.0114/a)均低于第二轮(0.0173/a、0.0185/a、0.0241/a),而Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ区在第一轮工程实施期间的植被增长率(0.0191/a、0.0179/a、0.0091/a、0.0113/a)均高于第二轮(0.0125/a、0.0117/a、0.0031/a、0.0048/a)。这表明第一轮工程的实施不仅使位于风沙过渡带的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区植被得到有效恢复,同时也促进了土壤结构、区域生态环境等条件的改善。因此,在第二轮工程实施期间, $NDVI$ 的增长速率加快。而Ⅵ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ区的气候条件较好,在第一轮工程结束后,植被覆盖基本达到稳定状态,第二轮工程则以保护和巩固现有成果为核心,植被增长的速度减缓。

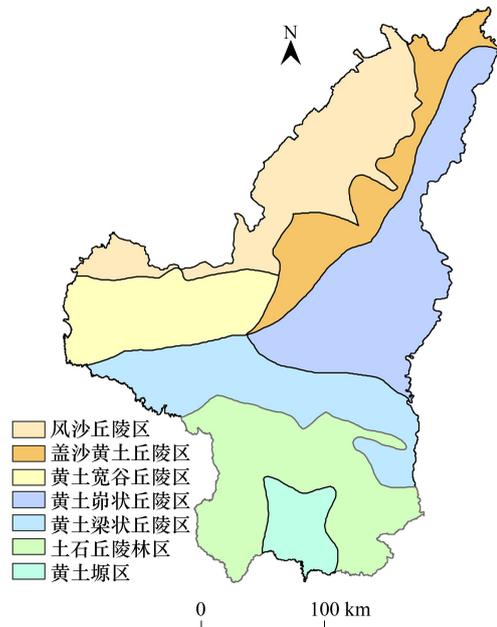


图 5 陕北黄土高原特征分区示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the characteristic zoning of the North Shaanxi Loess Plateau

表 3 陕北黄土高原各分区年 $NDVI_{max}$ 变化趋势

Table 3 Variation trend of annual $NDVI_{max}$ in different zones of the North Shaanxi Loess Plateau

分区 Zones	2000—2019			2000—2013			2014—2019		
	变化斜率 Change slopes	R^2	P	变化斜率 Change slopes	R^2	P	变化斜率 Change slopes	R^2	P
Ⅰ	0.0102	0.950	<0.01	0.0111	0.945	<0.01	0.0173	0.877	<0.01
Ⅱ	0.0130	0.803	<0.01	0.0171	0.860	<0.01	0.0185	0.380	<0.05
Ⅲ	0.0091	0.691	<0.01	0.0114	0.751	<0.01	0.0241	0.548	<0.05
Ⅳ	0.0138	0.831	<0.01	0.0191	0.920	<0.01	0.0125	0.229	<0.05
Ⅴ	0.0132	0.868	<0.01	0.0179	0.918	<0.01	0.0117	0.392	<0.05
Ⅵ	0.0055	0.818	<0.01	0.0091	0.889	<0.01	0.0031	0.484	<0.05
Ⅶ	0.0072	0.727	<0.01	0.0113	0.816	<0.01	0.0048	0.455	<0.05

气候因子对各分区的影响存在明显差异(表 4)。Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ、Ⅵ区的 $NDVI$ 在 $P < 0.05$ 水平上与年均气温呈显著负相关,Ⅶ区在 $P < 0.01$ 的水平上与年均气温呈极显著负相关,表明随着温度的升高, $NDVI$ 减小。主要是因为,在干旱的陕北地区,温度的升高导致土壤水分蒸发,土壤发生干化,不利于植被生长^[39]。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅵ、Ⅴ区的 $NDVI$ 与降水呈正相关,植被覆盖度高的Ⅵ、Ⅶ区与降水的相关性不显著,表明降水可以增加半干旱地区的土壤水分含量、促进植被生长;而森林生态系统稳定的Ⅵ、Ⅶ区对降水变化不敏感。各分区 $NDVI$ 与

年均日照时数相关性均不显著,表明研究区植被覆盖受日照时数的影响较小。

表 4 各分区年 NDVI_{max} 与气候因子相关系数

Table 4 Correlation coefficient between annual NDVI_{max} and climatic factors in each zone

分区 Zones	年总降水量 Total annual precipitation/mm	年均温 Mean annual temperature/°C	年均日照时数 Mean annual sunshine hours/h	分区 Zones	年总降水量 Total annual precipitation/mm	年均温 Mean annual temperature/°C	年均日照时数 Mean annual sunshine hours/h
I	0.39	-0.49 *	0.19	V	0.25	-0.50 *	-0.19
II	0.55 *	-0.50 *	0.18	VI	0.09	-0.49 *	-0.37
III	0.37	-0.41	-0.05	VII	0.10	-0.57 **	-0.41
IV	0.49 *	-0.43	0.14				

*, ** 分别表示在 $P < 0.05, P < 0.01$ 水平相关性显著

3.4 NDVI 变化的驱动力分析

使用残差分析法,剥离植被变化中的自然因素和人为因素。图 6 表明,气候变化及人类活动对于陕北地区植被变化的影响均存在空间差异性。第一轮工程实施期间,人类活动与气候变化对全区 NDVI 变化的影响分别为 $1.1 \times 10^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $2.5 \times 10^{-3} \text{ a}^{-1}$,即人类活动与气候变化促进全区 NDVI 增长的程度分别为 $1.1 \times 10^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $2.5 \times 10^{-3} \text{ a}^{-1}$ 。约有 96.85% 的区域表明人类活动对 NDVI 起促进作用(表 5)。其中,起明显促进、中度促进、

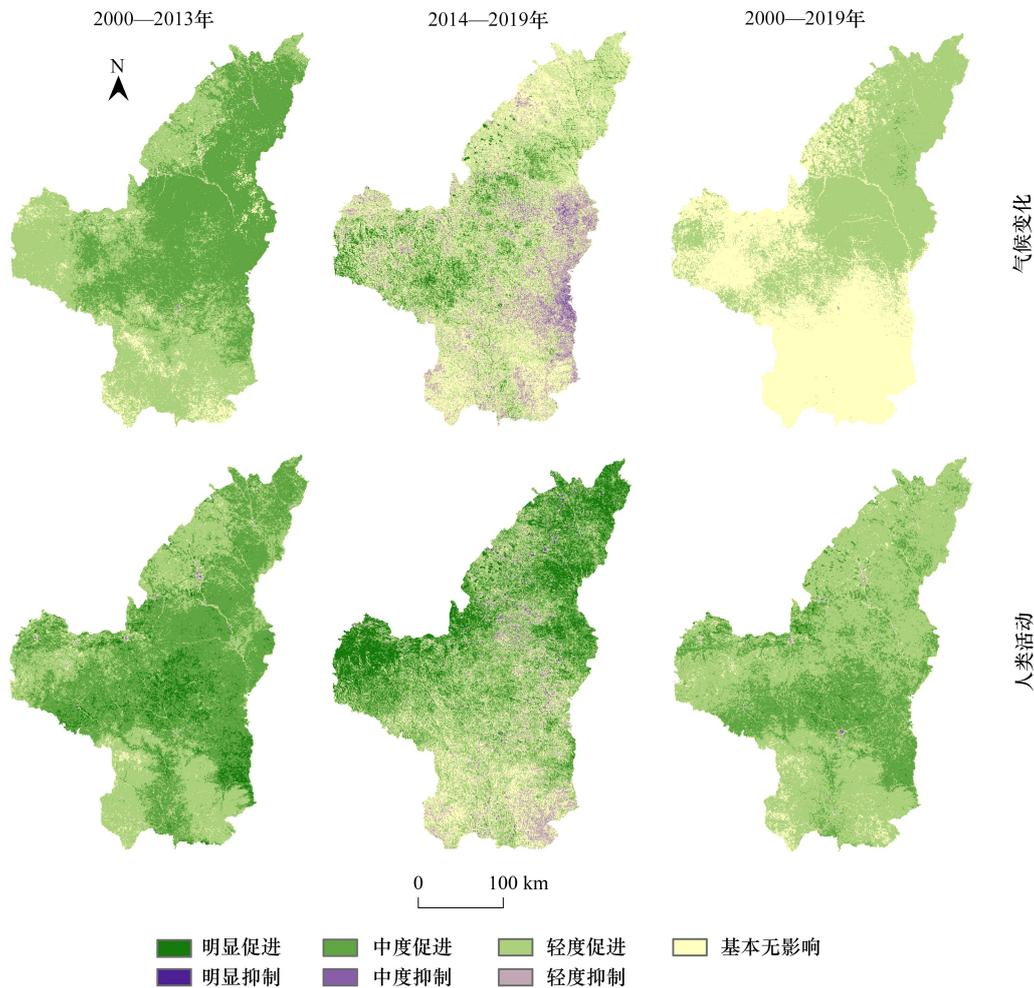


图 6 3 个时间段 NDVI 影响因素空间分布

Fig.6 Spatial distribution of influencing factors of NDVI in three time periods

轻微促进作用的面积占比分别为 6.35%、53.3%、37.2%。人类活动抑制 NDVI 的区域主要集中在建城区(图 6),面积占比为 0.61%。约有 91.88%的区域显示气候变化对 NDVI 起促进作用,仅有 0.26%的区域显示气候变化抑制 NDVI。对其驱动因素的空间分布进行分析统计可知(图 7),气候变化和人类活动的共同作用是引起 NDVI 变化的主要因素。单独由气候变化或人类活动引起 NDVI 变化的区域面积占比仅为 7.12%。总体来说,2000—2013 年气候因素对研究区植被变化的综合贡献率为 16.17%,人类活动的综合贡献率为 83.83%。

表 5 研究区 NDVI 影响因素等级及比例

Table 5 Grade and proportion of influencing factors of NDVI in study area

时间 Time	对植被 的影响 Effects on vegetation	像元占比 Pixel ratio/%						
		明显抑制 Significantly inhibited	中度抑制 Moderate inhibition	轻微抑制 Slightly inhibited	基本无影响 Basically no effect	轻微促进 Slightly promoted	中度促进 Moderate promoted	明显促进 Significantly promoted
2000—2013	气候变化	0	0.01	0.25	7.86	44.75	47.14	0
	人类活动	0.02	0.09	0.50	2.54	37.20	53.30	6.35
2014—2019	气候变化	0	2.39	15.65	28.02	37.77	13.12	3.04
	人类活动	0.30	0.86	6.27	17.71	33.20	26.58	15.08
2000—2019	气候变化	0	0	0.11	53.82	45.75	0.32	0
	人类活动	0.01	0.07	0.40	4.23	65.75	28.88	0.66

相较于第一轮退耕还林(草)工程,在第二轮工程实施期间,气候变化促进植被增长的速率增大($3.1 \times 10^{-3} \text{ a}^{-1}$);人类活动促进植被增长的速率减小($9.0 \times 10^{-3} \text{ a}^{-1}$)。约有 18.04%的区域显示气候变化对 NDVI 起抑制作用,主要分布在研究区东部和西北部;约有 53.94%的区域显示气候变化对 NDVI 起促进作用,主要分布在研究区西部(图 6)。人类活动对 NDVI 起抑制作用的面积占比也有所增大,起轻微抑制、中度抑制、明显抑制作用的面积占比分别为 6.27%、0.86%、0.3%。其中,起轻微抑制作用的面积占比显著增长,集中分布在延安市南部次生林区(图 6)。气候变化和人类活动的共同作用仍是引起 2014—2019 年 NDVI 变化的主要因素(图 7)。单独由气候变化导致 NDVI 增加的区域面积占比为 4.93%,导致 NDVI 减少的面积占比为 5.89%。总体来说,2014—2019 年气候因素对植被变化的综合贡献度为 37.91%,人类活动的综合贡献度为 62.09%。

图 6 表明,在退耕还林(草)工程实施的 20 年间,人类活动与气候变化对 NDVI 的促进作用远大于抑制作用。气候变化对 NDVI 的影响在空间上呈现明显差异性,具体表现为“南无影响北促进”(图 6)。而气候变化和人类活动的共同作用是引起研究区植被恢复的主要因素(图 7)。2000—2019 年,人类活动对整个陕北黄土高原植被变化的综合贡献率为 78.99%,气候因素对植被变化的综合贡献率为 21.01%。

3.5 不同驱动因素对各分区 NDVI 变化的相对贡献

对研究区各分区驱动因素贡献率进行分析统计,3 个研究时段内,人类活动对 NDVI 的贡献率在 44.44%—97.37%之间,气候变化对 NDVI 的贡献率在 2.61%—55.56%之间(图 8)。其中,2000—2013 年,各分区气候变化对 NDVI 的贡献率均低于 30%,植被覆盖度高的 VI 区和 VII 区贡献率低于 10%。人类活动贡献率占比高于 80%的区域有 6 个,其中 VII 区贡献率占比最高,为 97.39%。在第二轮退耕还林(草)工程期间,各分区气候变化贡献率均有所增加,其中 V 区、VI 区和 VII 区贡献率达到了 45%以上, VII 区气候变化贡献率占比最大,为 55.56%。这表明,在第一轮工程实施期间,相较于气候变化,人类活动是研究区植被变化的主要原因。在第二轮工程实施期间,随着植被覆盖的大范围提升,覆盖程度趋于饱和,人类活动的影响减小,气候因素的贡献度不断增大。这一现象在植被茂盛的 VI 区和 VII 区表现最为明显。总体来看,在退耕还林(草)工程实施后的 20 年内,各分区人类活动对 NDVI 变化的影响大于气候变化。

4 讨论

本文基于 2000—2019 年 MODIS NDVI 和同期气象数据分别从全域和分区尺度上对两轮退耕还林(草)工

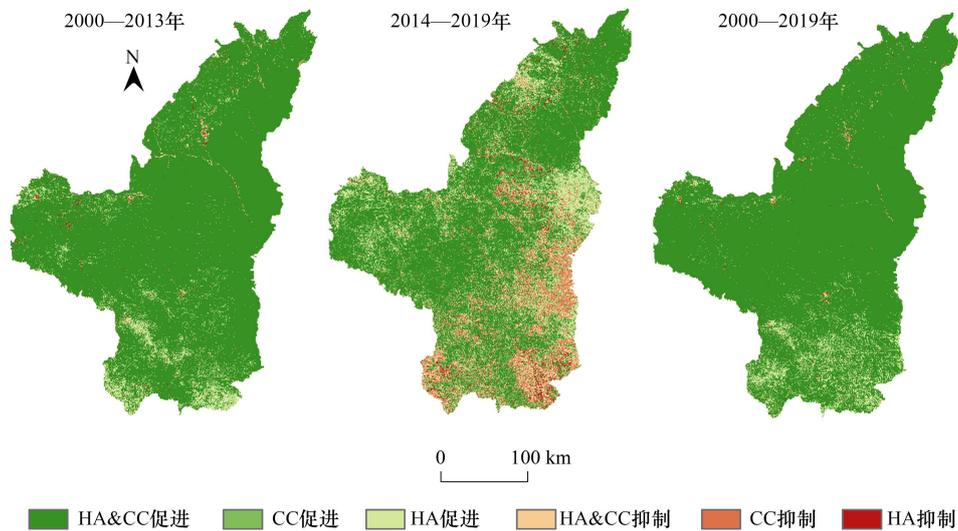


图7 3个时间段研究区植被覆盖变化驱动因素空间分布

Fig.7 Spatial distribution of drivers of vegetation cover change in the study area in three time periods

HA 为人类活动 Human activities; CC 为气候变化 Climate change

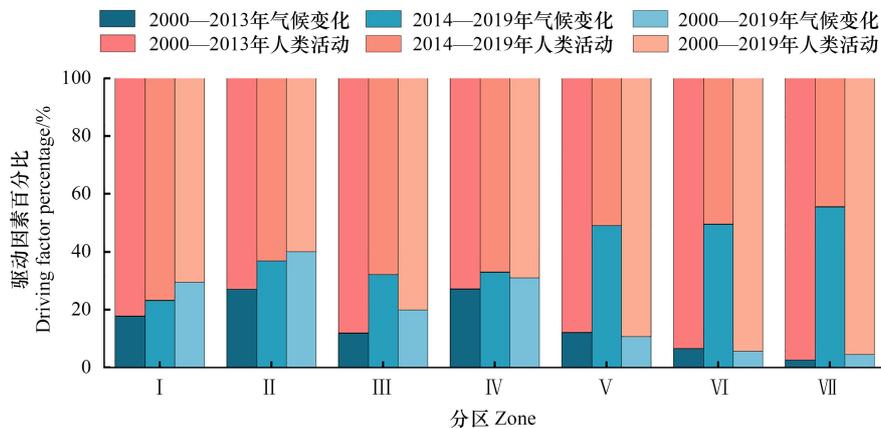


图8 陕北黄土高原驱动因素贡献比

Fig.8 Contribution ratio of driving factors in the North Shaanxi Loess Plateau

程实施下的陕北黄土高原 NDVI 变化和驱动因素进行分析。研究发现,气候变化和人类活动的共同作用是陕北地区植被覆盖发生变化的主要原因,其中人类活动占主导地位。两轮工程实施期间,人类活动对研究区植被变化的影响分别为 $1.1 \times 10^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $9.0 \times 10^{-3} \text{ a}^{-1}$,呈减小趋势;气候变化的影响分别为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ a}^{-1}$ 、 $3.1 \times 10^{-3} \text{ a}^{-1}$,呈增大趋势。各分区气候因素对 NDVI 的贡献率在第二轮退耕还林(草)工程实施期间较第一轮明显增大(图8)。这表明,人类活动能在短时间内改变地表植被覆盖,导致 NDVI 对气候的敏感度降低,尤其体现在年均降水量低于 450mm 的 I 区和 II 区。该地区气候条件恶劣,人类活动的正向影响是改善当地植被的主要因素。但在长时间序列尺度上,气候变化对植被的生长和分布将产生主要影响。

在过去的 20 年间,经过长期的生态建设,黄土高原地表景观虽然已经完成了由“黄”到“绿”的转变,但不合理的人为植被恢复行为造成的环境负效应也在逐渐显现,尤其是水资源平衡问题。水分是干旱半干旱地区植被恢复的主要限制因子^[40],水资源平衡是陕北黄土高原植被长期恢复需要关心的核心问题^[41]。Feng 等研究发现土壤水分变化显著影响植被时空变化,不合理的植被修复可能会对区域水文循环造成影响,造成土壤

水资源亏损严重,从而影响植被生长发育,甚至导致群落衰败和生态系统退化,使退耕还林(草)成果的可持续性存在风险^[42—43]。如黄土高原大面积的人工生态林因林分结构单一、植被密度过大等出现衰退甚至死亡的现象^[44]。图9表明,降水量大于600mm、植被覆盖度高的Ⅵ区和Ⅶ区根区及表层土壤水分在研究期间均呈下降趋势,且与NDVI呈负相关。这是因为大范围的人工植被恢复增加了叶片截留和根系吸收^[45],大量消耗土壤水分,打破了植被恢复耗水量与土壤水补给量的动态平衡关系^[46],导致土壤水分减少,造成土壤干化。这也解释了在第二轮工程中植被密集的Ⅵ区和Ⅶ区NDVI发生退化的现象。基于此,为保障退耕还林(草)工程的持续健康发展,实现黄土高原地表覆盖由“绿”到“深绿”转变的目标,在进行生态恢复时需关注土壤水分等自然条件,不应过度强调植树造林。而应根据当地的气候条件,确定合理的植被建设类型、密度等生态恢复策略,以达到区域恢复的可持续性。

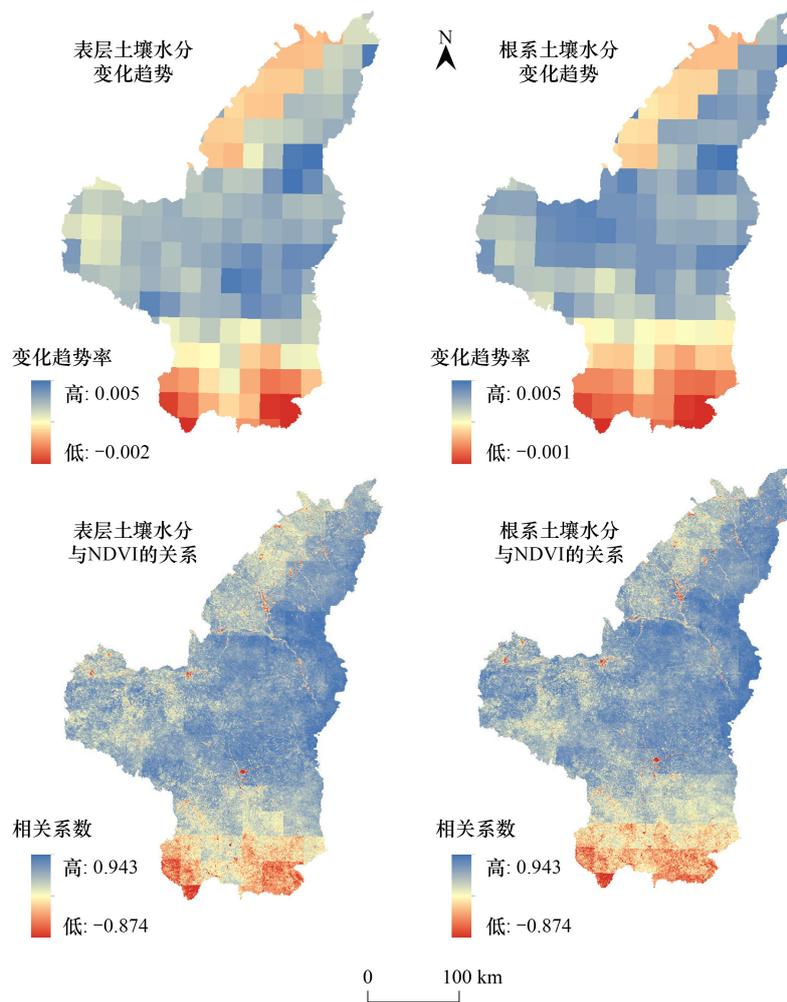


图9 2000—2019年研究区土壤水分变化趋势及与NDVI的相关性

Fig.9 Variation trend of soil moisture in the study area from 2000 to 2019 and its correlation with NDVI

本研究中虽然使用残差分析法剔除了气候因素对植被变化产生的影响,但主要着眼于分析退耕还林(草)工程实施对区域植被变化带来的影响,而未定量研究城市化进程加快、不合理的耕种方式等人类活动对植被变化的影响。在接下来的研究中,将建立人类活动评估体系,对陕北黄土高原植被变化的人为因素进行定量研究和驱动分析。总体来说,随着退耕还林(草)工程生态效益的充分体现,陕北地区NDVI已到达了一定的高点,但经济发展和不合理的植被建设促使研究区部分区域植被发生不同程度的退化^[47—48]。因此如何巩固退耕成果、保障生态工程质量效益、缓解下降趋势是未来研究区生态建设需考虑的重大问题。鉴于在未

来很长的一段时间研究区经济发展趋势很难放缓,研究区应在当前和今后一段时期内坚持保护优先、绿色发展的原则,重视脆弱的生态环境条件对植被恢复的影响和约束,完善巩固机制,优化植被结构,平衡生态修复和社会经济发展关系。

5 结论

(1)2000—2019年,陕北黄土高原 NDVI 呈显著增加趋势,年均增长率为 0.0103/a,改善面积占总面积的 93.6%。各分区年均 NDVI 为土石丘陵林区(Ⅵ区)>黄土塬区(Ⅶ区)>黄土梁状丘陵区(Ⅴ区)>黄土崩状丘陵区(Ⅳ区)>盖沙黄土丘陵区(Ⅱ区)>黄土宽谷丘陵区(Ⅲ区)>风沙丘陵区(Ⅰ区),均呈增加趋势。

(2)研究区植被覆盖变化受气候因素和人类活动的共同作用。20年间,气候因素对植被覆盖的影响程度逐渐加深,第二轮退耕工程实施期较第一轮实施期,气候变化对各分区 NDVI 的贡献率均呈增大趋势;而人类活动对植被覆盖的影响程度则逐渐降低,第二轮退耕工程实施期较第一轮实施期,植被改善面积减小,改善速度减缓。

(3)人类活动虽能在短时间内改变地表植被状况,但植被的生长在较长时间上主要受环境条件的制约。在第二轮退耕工程实施期间,受水分条件的影响,植被较为密集的Ⅵ、Ⅶ区发生退化。

参考文献(References):

- [1] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, Gaillard J M, Tucker C J, Stenseth N C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [2] 王静, 万红莲, 姚顺波. 生长季川陕不同地带植被覆盖对气候变化的时空响应. *生态学报*, 2019, 39(14): 5218-5231.
- [3] 王静, 刘天军. 基于 RUE 的植被覆盖动态演变特征及归因分析——以宝鸡地区为例. *生态环境学报*, 2020, 29(6): 1078-1089.
- [4] 段艺芳, 任志远, 孙艺杰. 陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应. *生态学报*, 2020, 40(10): 3408-3419.
- [5] 叶璇, 康帅直, 赵永华, 韩磊, 项曦明, 李帆. 陕北黄土高原植被恢复与生态系统服务的时空关系. *应用生态学报*, 2022, 33(10): 2760-2768.
- [6] 温仲明, 焦峰. 自然植被分布预测研究进展. *中国水土保持科学*, 2009, 7(5): 117-124.
- [7] 刘文超, 刘纪远, 匡文慧. 陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征. *地理学报*, 2019, 74(9): 1835-1852.
- [8] Tang Z X, Zhou Z X, Wang D, Luo F B, Bai J Z, Fu Y. Impact of vegetation restoration on ecosystem services in the Loess Plateau, a case study in the Jinghe Watershed, China. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109183.
- [9] 张博, 刘长星, 王璇. 陕北黄土高原植被覆盖时空变化及其归因分析. *测绘通报*, 2022, (8): 22-29.
- [10] 孙从建, 张文强, 李新功, 孙九林. 基于遥感影像的黄土高原沟壑区生态效应评价. *农业工程学报*, 2019, 35(12): 165-172.
- [11] Liu C X, Zhang X D, Wang T, Chen G Z, Zhu K, Wang Q, Wang J. Detection of vegetation coverage changes in the Yellow River Basin from 2003 to 2020. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108818.
- [12] 田智慧, 任祖光, 魏海涛. 2000—2020年黄河流域植被时空演化驱动机制. *环境科学*, 2022, 43(2): 743-751.
- [13] Liu S C, Shao Q Q, Ning J, Niu L N, Zhang X Y, Liu G B, Huang H B. Remote-sensing-based assessment of the ecological restoration degree and restoration potential of ecosystems in the upper Yellow River over the past 20 years. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3550.
- [14] 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.
- [15] 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. *生态学报*, 2020, 40(2): 678-691.
- [16] 晋成名, 杨兴旺, 景海涛. 基于 RS 的陕北地区植被覆盖度变化及驱动力研究. *自然资源遥感*, 2021, 33(4): 258-264.
- [17] 李依璇, 朱清科, 石若莹, 苟清平. 2000—2018年黄土高原植被覆盖时空变化及影响因素. *中国水土保持科学: 中英文*, 2021, 19(4): 60-68.
- [18] 朱会利, 杨改河, 韩磊. 延安市退耕过程植被覆盖度变化及其影响因子分析. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 272-280.
- [19] 李焱, 巩杰, 戴睿, 靳甜甜. 藏西南高原植被覆盖时空变化及其与气候因素和人类活动的关系. *地理科学*, 2022, 42(5): 761-771.
- [20] Meng X Y, Gao X, Li S Y, Lei J Q. Spatial and temporal characteristics of vegetation NDVI changes and the driving forces in Mongolia during 1982-2015. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 603.
- [21] 白建军, 白江涛, 王磊. 2000—2010年陕北地区植被 NDVI 时空变化及其与区域气候的关系. *地理科学*, 2014, 34(7): 882-888.
- [22] 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. *地理研究*, 2020, 39(5): 1200-1214.
- [23] 易浪, 任志远, 张翀, 刘雯. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系. *资源科学*, 2014, 36(1): 166-174.

- [24] 尚雪, 何钊全, 张铜会. 退耕还林(草)过程中陕北地区 NDVI 时空变异及其驱动因子的地理探测. 生态科学, 2022, 41(1): 66-76.
- [25] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 侯建, 信忠保, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [26] Paruelo J M, Epstein H E, Lauenroth W K, Burke I C. Anpp estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. Ecology, 1997, 78(3): 953-958.
- [27] 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.
- [28] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.
- [29] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展. 地球科学进展, 1998, 13(4): 10-16.
- [30] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [31] 康雄, 曹俊涛, 陈成, 杨杰, 王建雄. 不同趋势法的宁夏长时序植被变化分析. 测绘通报, 2020, (11): 23-27.
- [32] 肖强, 陶建平, 肖洋. 黄土高原近 10 年植被覆盖的动态变化及驱动力. 生态学报, 2016, 36(23): 7594-7602.
- [33] 余玉洋, 宋丰艺, 张世杰. 2000—2020 年河南省 NDVI 时空变化及其驱动因素定量分析. 生态环境学报, 2022, 31(10): 1939-1950.
- [34] 杨丹, 王晓峰. 黄土高原气候和人类活动对植被 NPP 变化的影响. 干旱区研究, 2022, 39(2): 584-593.
- [35] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 史尚渝, 丁文斌. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [36] 刘炜, 焦树林, 安全, 李银久, 张洁, 莫跃爽, 邵雨潇, 冯椰林. 气候变化及人类活动对贵州省 1998—2018 年 NDVI 的影响. 长江流域资源与环境, 2021, 30(12): 2883-2895.
- [37] 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. 水土保持通报, 2021, 41(1): 327-336.
- [38] 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.
- [39] 赵景波, 侯甬坚, 黄春长. 陕北黄土高原人工林下土壤干化原因与防治. 中国沙漠, 2003, 23(6): 612-615.
- [40] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, Los S O, Myneni R B, Taylor M G. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. International Journal of Biometeorology, 2001, 45(4): 184-190.
- [41] 金钊. 黄土高原小流域退耕还林还草的生态水文效应与可持续性. 地球环境学报, 2022, 13(2): 121-131.
- [42] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services; an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. Scientific Reports, 2013, 3(1): 2846.
- [43] Shao R, Zhang B Q, Su T X, Long B, Cheng L Y, Xue Y Y, Yang W J. Estimating the increase in regional evaporative water consumption as a result of vegetation restoration over the Loess plateau, China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(22): 11783-11802.
- [44] 黄志霖, 傅伯杰, 陈利顶. 恢复生态学与黄土高原生态系统的恢复与重建问题. 水土保持学报, 2002, 16(3): 122-125.
- [45] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology, 2010, 381(1): 9-17.
- [46] 张宝庆, 邵蕊, 赵西宁, 吴普特. 大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 594-606.
- [47] 钱琛, 陈海滨, 侯现慧. 生态建设背景下陕西省植被覆盖时空变化及其影响因素研究. 干旱区地理, 2020, 43(2): 425-433.
- [48] 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. 生态学杂志, 2020, 39(1): 1-10.