

生态工程背景下黄土高原植被变化 时空特征及其驱动力

修丽娜¹, 颜长珍², 钱大文³, 幸赞品²

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院 西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008)

摘要: [目的] 分析 1990—2015 年黄土高原植被的时空演变规律, 并从气候变化和人类活动两个方面分析该地区植被变化的驱动力, 以为生态环境保护相关政策的制定和区域可持续发展提供理论依据。[方法] 基于 GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 建立长时间序列 NDVI 数据集, 采用线性趋势分析、多元线性回归和改进的人类残差等分析方法, 以 NDVI 为指标, 辅助土地利用数据, 对黄土高原地区 1990—2015 年期间植被时空变化特征及其影响因素进行了定量分析。[结果] ①在 1990 到 2015 年期间, 黄土高原地区植被的 NDVI 总体表现为上升趋势, 且变化趋势较明显的分为两个时期, 其中 2000 年以后 NDVI 上升速率较快; ②2000 年以后, 黄土高原植被 NDVI 迅速上升, 上升区域面积达到总面积的 91.90%, 其中 NDVI 显著上升面积比为 65.78%; ③黄土高原地区植被面积总体表现为增加, 且主要来自于耕地的转入; ④人类活动促使的植被恢复区域占黄土高原总面积的 21.74%, 主要分布在内蒙古的东部和北部、甘肃和宁夏的南部, 以及陕西和山西的中部地区。[结论] 随着退耕还林还草政策的实施, 黄土高原地区植被面积持续增加, 且植被生长状况持续变好, 黄土高原植被恢复的原因主要是气候和人类共同影响, 其中人类影响的程度较大。

关键词: 植被状况; 气候因子; 人类活动; 残差分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)04-0214-08

中图分类号: Q948.1, TP79

文献参数: 修丽娜, 颜长珍, 钱大文, 等. 生态工程背景下黄土高原植被变化时空特征及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 214-221. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.034; Xiu Lina, Yan Changzhen, Qian Dawen, et al. Analysis of spatial-temporal change and driving forces of vegetation in Loess Plateau under background of ecological engineering[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 214-221.

Analysis of Spatial-temporal Change and Driving Forces of Vegetation in Loess Plateau Under Background of Ecological Engineering

Xiu Lina¹, Yan Changzhen², Qian Dawen³, Xing Zanpin²

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal evolution of vegetation on the Loess Plateau from 1990 to 2015 was studied, and the driving forces of vegetation change in this region were analyzed from the aspects of climate change and human activities in order to provide a theoretical basis for formulating policies related to ecological environmental protection and regional sustainable development. [Methods] Based on GIMMS NDVI and MODIS NDVI, long-term sequence NDVI datasets were established. During the period of 1990—2015, the linear trend analysis, multiple linear regression and improved human residuals were used to analyze the spatial and temporal variation of vegetation with NDVI and land use data in the Loess Plateau. The characteristics and their influencing factors were quantitatively analyzed. [Result] ① Between 1990 and

收稿日期: 2019-01-07

修回日期: 2019-01-25

资助项目: 国家重点研发计划项目子课题“西北地区土地覆被监测”(2016YFC0500201-04)

第一作者: 修丽娜(1988—), 女(汉族), 甘肃省兰州市人, 博士, 研究方向为生态遥感。E-mail: xiulina@lzb.ac.cn.

通讯作者: 颜长珍(1967—), 男(汉族), 甘肃省岷县人, 博士, 研究员, 主要从事土地利用、生态遥感方面的研究。E-mail: yanzc@lzb.ac.cn.

2015, the NDVI of the Loess Plateau showed an upward trend, and the trend of change was more clearly divided into two periods, of which the rate of NDVI increased faster after 2000. ② After 2000, the NDVI of the Loess Plateau increased rapidly, and the rising area reached 91.90% of the total area, of which the NDVI significantly increased area ratio was 65.78%. ③ The overall area of vegetation in the Loess Plateau increased, and it mainly came from the transfer of cultivated land. ④ The vegetation restoration area promoted by human activities accounted for 21.74% of the total area, mainly distributed in the eastern and northern parts of Inner Mongolia, southern area of Gansu and Ningxia Region, as well as the central areas of Shaanxi and Shanxi Province. [Conclusion] With the implementation of the policy of returning farmland to forest and grass land, the vegetation area in the Loess Plateau continued to increase, and the vegetation growth continued to improve. The main reason for the restoration of vegetation on the Loess Plateau was the combination of climate and humans, and the degree of human influence was relatively larger.

Keywords: vegetation status; climatic factors; human activities; residual analysis

黄土高原作为我国历史上开发时间较早、人工改造力度较大的区域之一,深受人类活动干扰的影响,尤其是过去几十年来,毁林开荒、过度放牧等行为严重的破坏当地的生态环境^[1-2],再加上黄土高原地处半干旱半湿润气候带,风力和水力侵蚀严重,导致了水土流失、沙漠化加剧等一系列的生态环境问题^[3-4]。针对这些生态环境问题,1990年以来,我国开始实施退耕还林还草的一系列生态恢复工程,而黄土高原则是重点实施区域之一^[5-6]。植被是陆地生态系统的重要组成部分,在陆地表面能量交换、水分循环和生物地球化学循环过程中起着至关重要的作用^[7]。植被的时空变化会影响全球碳循环和气候系统的稳定性,监测植被的时空变化趋势对研究全球气候变化背景下的陆地生态系统具有重要的意义^[8]。一方面,植被变化是区域生态变化的有效指标,其时空变化特征可以作为生态恢复工程的评价依据,另一方面,植被改善能够通过改变地表反射率和下垫面粗糙度以达到减缓径流冲刷、风力侵蚀和保持水土的作用,对区域生态环境起促进作用^[9]。因此黄土高原地表植被的变化研究对于该地区环境保护和生态工程建设具有重要的指示意义。

归一化植被指数(normal difference vegetation index, NDVI)是目前最常用表示植被生长状况的指标,它与植被覆盖度、生物量和光合作用强度等都密切相关^[10-11]。很多学者利用 NDVI 对于黄土高原地区植被状况的研究已经做了大量的工作,并取得了丰富的成果。高健健等^[12]利用 1981—2012 年的 NDVI 数据遥感反演黄土高原的植被覆盖度,并发现 2001 年以后该区生长季平均植被覆盖度大于之前,呈现增加趋势。李双双等^[11]发现 2000—2009 年陕甘宁黄土高原地区 NDVI 增速远快于三北防护林工程区,这一结果主要是有人类活动和气候变化共同驱动,且

人类活动作用明显。肖强等^[7]通过 NDVI 数据估算了黄土高原植被覆盖度,其研究结果发现 2000—2010 年植被覆盖度总体呈现东南高西北低,由东南向西北递减的特征。然而,这些研究通常使用单一数据集来评估相对较短时期内或较粗分辨率的植被动态,导致缺乏对植被变化的长期监测,使这些研究的代表性有限。此外,NDVI 作为表征植被生长状况的指标,以往研究仅从 NDVI 单方面对黄土高原地区植被进行评价,无法获取全面的植被变化信息。植被生长受到环境驱动因素(例如气候变化)和人类活动的影响,在已有研究中区分这些因素的方法主要分为 3 种:①利用气候与 NDVI 之间的相关性,并辅助相应的统计数据间接的区分气候因素和人类活动对 NDVI 变化的影响^[4,11];②使用水分利用效率变化模型提取人类影响,该方法只适合于植被变化主要受降水因素影响的干旱和半干旱区域^[13];③利用回归残差法能较好的区分气候因素和人类活动对植被的影响,目前应用较为广泛^[1,14]。但此方法只是单纯的得出人类活动对植被 NDVI 的正或负面影响,对于人类和气候共同影响的区域没有明确得出。为此,本研究利用 GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 相关关系将 MODIS NDVI 时序延伸,获得长时间序列较高分辨率的 NDVI 数据集,从植被质量角度,以生长季 NDVI 作为指标对 1990—2015 年黄土高原植被的时空演变规律进行分析,辅助土地利用数据从植被面积变化角度全面分析黄土高原植被时空变化特征,并从气候变化和人类活动两个方面分析本地区植被变化的驱动力,以期对生态环境保护相关政策的制定、区域可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于我国中部偏北,黄河流域中部,地

理位置为 33°41′—41°07′N, 100°54′—114°07′E。黄土高原地跨山西、宁夏、陕西、甘肃、内蒙古、河南和青海省,总面积为 $6.24 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。区域内地势西北高、东南低,千沟万壑、地形破碎。气候为大陆性季风气候,冬季寒冷干燥多风沙,夏季炎热多暴雨。植被由东南向西北可划分为森林带、森林草原带、典型草原带、荒漠草原和草原化荒漠带。土壤类型主要有黄绵土、黑钙土等^[12,15-16]。

1.2 研究数据

1.2.1 NDVI 数据来源及处理 本研究利用的遥感数据为 NOAA/AVHRR 和 TERRA/AQUA MODIS 的 NDVI 数据集,NOAA/AVHRR NDVI 数据集来自戈达德航天中心(Goddard Space Flight Center, GSFC)全球监测与模型研究(Global Inventor Modeling and Mapping Studies, GIMMS)数据中心。影像以 32bit geotiff 格式存放,采用 Albers Conic 投影方式,空间分辨率为 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$,时间分辨率为 15 d,时间序列从 1990 年 1 月至 2006 年 12 月(可在 ftp.glcf.umd.edu 免费下载)。MOD₁₃A₃ 是 MODIS 陆地产品组开发的月植被指数产品,包括月最大合成的 NDVI 和 EVI 植被指数,空间分辨率为 1km,可以通过 NASA 对地观测系统数据共享平台(https://earthdata.nasa.gov/)下载。

已有研究^[17]发现 GIMMS 和 GIMMS 3g 数据集在北半球存在较大差异,因此建议可以结合 GIMMS 和 MODIS 数据对该区域的植被变化进行分析。通过 GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 相关关系建立将 MODIS NDVI 时序延伸。首先将 15 d GIMMS NDVI 数据采用最大值合成法生成月 NDVI 数据集,然后将 MODIS 1km 月 NDVI(MOD₁₃A₃)数据集按照 GIMMS NDVI 的 8km 格网分别计算每个格网的月 NDVI 均值和最小值。计算最小值主要是为排除非植被的区域做数据准备,求得的均值是与 GIMMS NDVI 数据做匹配。选取研究区内,2000—2006 年 7 年间逐月最小值均 > 0 的格网,分别计算 7 年每个月 GIMMS NDVI 同 MODIS NDVI 均值之间的线性相关系数^[18-20],结果详见表 1。选取最小值大于 0 的栅格主要是筛选出植被分布区域,由于 1 km 分辨率相较 8 km 的空间分辨率较精细,便于排除非植被区域 NDVI 值参与计算。然后依据此关系,使用 1990—1999 年 GIMMS NDVI 扩展 MODIS NDVI 的时间序列。为了反映植被 NDVI 的年际变化特征,本研究中采用生长季 NDVI 值(4—10 月 NDVI 的平均值)来表征植被生长^[8]。

表 1 GIMMS NDVI 与 MODIS NDVI 之间的相关关系

月份	像元数	参数估计		回归检验	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	RMSE
1	226 985	0.727	0.033	0.845	0.051
2	222 175	0.749	0.023	0.873	0.042
3	335 459	0.709	0.030	0.838	0.045
4	370 184	0.781	0.020	0.875	0.048
5	376 391	0.824	0.013	0.873	0.064
6	391 512	0.849	0.010	0.852	0.083
7	421 885	0.888	0.007	0.881	0.087
8	424 014	0.883	0.010	0.877	0.089
9	413 307	0.855	0.019	0.872	0.080
10	373 024	0.792	0.024	0.879	0.056
11	322 274	0.792	0.017	0.915	0.042
12	307 161	0.752	0.020	0.874	0.047

1.2.2 气象数据来源及处理 气象数据来源于中国气象局提供的中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/home.do),包括 1990—2015 年黄土高原及其周边地区共 84 个气象台站观测的日平均气温和日降水量数据。本文利用 ANUSPLIN 4.3 软件对整理好的月降水和温度进行空间插值,空间分辨率为 1 km。该方法已经广泛应用于气象因素的插值^[21],其精度要高于反距离权重(inverse distance weighted, IDW)和克里金插值(Kriging)^[22]。

1.2.3 土地利用数据的解译 本研究中用于土地利用解译的影像包括没有云覆盖的 1990,2000,2005,2010 的 TM 影像和 2015 年的 OLI 影像,这些数据下载于美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)网站(http://glovis.usgs.gov/)。大多数选定的图像是从 6 月到 9 月获得的,丢失的图像或质量差的图像被替换为同期最近的月份或年份的图像。在进行遥感解译之前,影像已经通过几何校正,辐射校正和大气校正等预处理。本研究中使用的 6 种土地利用类型分别是:林地,草地,耕地,人工表面和其他类型,其中其他类型包括裸岩、戈壁、裸土、沙漠和盐碱地^[23]。通过 eCognition 8.6 软件从影像中提取土地覆盖信息,该软件使用面向对象的分类方法^[24-25]。

1.3 研究方法

1.3.1 变化趋势分析 为了研究过去 26 a 来黄土高原植被的生长状况及在空间上的差异,使用一元线性回归对每个像元进行斜率分析^[7]。当斜率为正时,表示随时间变化植被指数升高;反之,斜率为负时,表示随时间变化植被指数呈现下降趋势。对所得的斜率进行显著性水平检验,通过置信度检验的区域则认为植被变化的趋势显著。其计算公式为:

$$\Theta_{\text{slop}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NDVI}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: n ——模拟的时间序列长度($n=26$); i ——时间序列的序号; $NDVI_i$ ——第 i 年的 NDVI 值; Θ_{slope} ——变化曲线的斜率。

1.3.2 土地利用类型净变化率 年均土地利用类型净变化率定量反映该土地利用类型面积变化速率,其对比各土地利用类型变化的区域差异具有重要作用^[26]。其计算公式为:

$$K = \frac{U_a - U_b}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: K ——某土地利用类型年均净变化率; U_a , U_b ——研究初期与末期某一种土地利用类型的面积; T ——研究时期时长,时段设定为年。

1.3.3 土地利用类型转移矩阵 利用土地利用类型面积作为土地利用类型状态转移矩阵中的向量,分别统计 1990—2000 年和 2000—2015 年 2 期的转移矩阵^[27],计算过程为:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: A ——面积; $i, j (i, j = 1, 2, \dots, n)$ ——转移前与转移后的土地利用类型; A_{ij} ——土地利用类型从类型 i 变为 j 的面积; n ——转移前后土地利用类型数。

1.3.4 多元回归分析 气候因素(温度和降水)之间通常是相互作用的,并且对植被的影响不是对立的。本研究利用多元回归分析方法来研究温度、降水对 NDVI 的共同影响^[28]。

$$\frac{NDVI - \overline{NDVI}}{\sigma_{NDVI}} = \beta_0 + \beta_1 \times \frac{CLM_1 - \overline{CLM_1}}{\sigma_1} + \dots + \beta_n \frac{CLM_n - \overline{CLM_n}}{\sigma_n} \quad (4)$$

式中: \overline{NDVI} ——多年 NDVI 平均值; σ_{NDVI} ——多年 NDVI 的标准差; $\overline{CLM_i}$ ——第 i 个气候因子的多年平均值; σ_i ——第 i 个气候因子的标准差。

利用 F 检验对上述多元线性回归方程进行显著性检验。

1.3.5 改进的残差趋势分析 残差趋势法由 Evans 和 Geerken 提出^[13],该方法利用每个像元全时间序列的年 NDVI 与降水数据建立响应关系,从而得到每个像元在全时间序列上实际 NDVI 与预测 NDVI 的残差,从而判断人类因素对植被生长状况的影响^[29]。曹鑫等^[30]考虑到温度对植被生长的影响,在已有模型基础上加入了温度因子。

$$\Delta NDVI = NDVI_{\text{真实值}} - NDVI_{\text{模拟值}} =$$

$$\begin{cases} < 0 & \text{(人类活动产生负面影响)} \\ = 0 & \text{(人类活动干扰较小)} \\ > 0 & \text{(人类活动产生正面影响)} \end{cases} \quad (5)$$

为了研究更深入地研究气候和人类活动对于植被变化的影响程度,田海静^[31]等在以上模型的基础上,将年度 NDVI 的变化趋势与气候变化之间相关性不显著的区域相对应。①由气候变化引起的植被显著恢复。NDVI 随时间的变化趋势显著增加,NDVI 与气候因素显著相关且 NDVI 残差趋势变化不显著;②由气候变化引起的植被显著退化。NDVI 随时间的变化趋势显著下降,NDVI 与气候因素显著相关且 NDVI 残差趋势变化不显著;③由人类引起的植被显著恢复。NDVI 随时间的变化趋势显著增加,NDVI 与气候因素不显著相关且 NDVI 残差趋势变化显著增加;④由人类引起的植被显著退化。NDVI 随时间的变化趋势显著下降,NDVI 与气候因素不显著相关且 NDVI 残差趋势变化显著下降;⑤气候因素和人类活动共同引起的植被显著恢复。NDVI 随时间的变化趋势显著增加,NDVI 与气候因素显著相关且 NDVI 残差趋势变化显著增加;⑥气候因素和人类活动共同引起的植被显著退化。NDVI 随时间的变化趋势显著下降,NDVI 与气候因素显著相关且 NDVI 残差趋势变化显著下降。

2 结果与分析

2.1 黄土高原地区植被质量时空变化

2.1.1 黄土高原地区植被 NDVI 年际变化特征

由图 1 可以看出,1990—2015 黄土高原地区植被的 NDVI 总体表现为上升趋势,且变化趋势较明显的分为两个时期:1990—1999 年期间,黄土高原地区的 NDVI 值波动较大,在 0.3304~0.367 0 之间,有轻微的减少趋势,特别是 1998 和 1999 年;2000 年以后,该区域的 NDVI 表现为增加趋势,范围为 0.286 4~0.372 3,最大值出现在 2012 年。

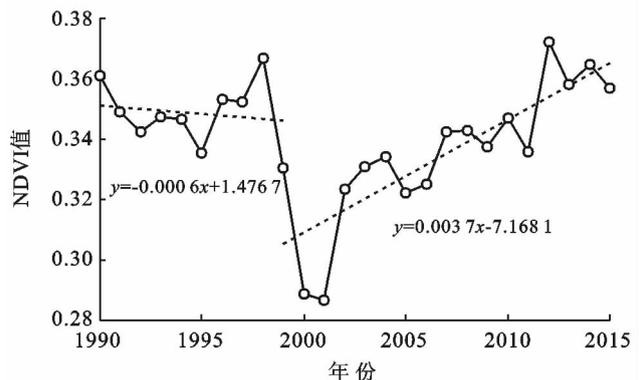


图 1 黄土高原 1990—2015 年生长季 NDVI 年际变化

2.1.2 黄土高原地区植被 NDVI 空间变化特征

为了便于分析 1990—2015 年黄土高原 NDVI 变化趋势的空间分布规律,对这 26 a 以来生长季的 NDVI 逐像元进行一元线性回归分析(图 2),将所得相关系数进行 0.05 显著性水平检验,所得变化趋势分布图(图 3)。黄土高原地区植被 NDVI 呈现增加趋势的区域面积较大,主要分布在黄土高原的东部、中部和南部地区,包括陕西省的北部,甘肃和宁夏地区南部,内蒙古自治区的东部,以及山西省的西部,其他区域的植被也有不同程度的增加;NDVI 降低的区域主要分布在宁夏和内蒙古的北部,陕西的南部,以及山西的部分区域。年均增长率最大的像元值达到 0.020 0,年均负增长率最大的像元值达到 -0.027 4(图 2)。

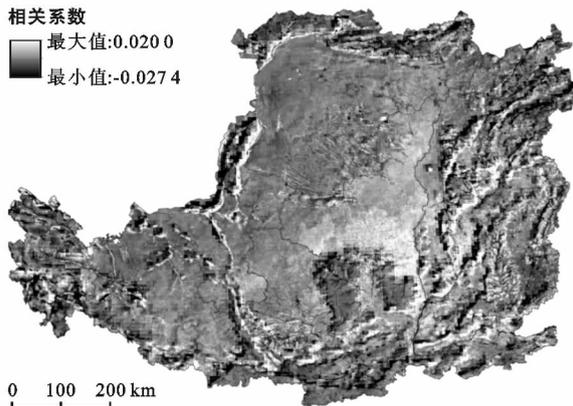


图 2 黄土高原 1990—2015 年生长季 NDVI 变化趋势

从黄土高原 NDVI 显著性变化趋势分布图(图 3)可以看出,1990—2015 年黄土高原植被 NDVI 整体呈现的上升趋势,显著上升的区域主要集中在中部和东部地区。研究结果表明(表 2),1990—2015 年期间,黄土高原地区 53.45% 的地区,植被 NDVI 呈上升趋势,其中 33.05% 的地区植被为显著上升。植被 NDVI 下降的区域主要分布在甘肃和宁夏地区的北部,陕西省的南部和山西省的东部等地,有 46.55% 的地区植被 NDVI 呈下降趋势,其中 24.61% 的地区植被 NDVI 呈显著下降。1990—1999 年,黄土高原的植被 NDVI 总体呈现降低趋势,上升区域面积占总面积的 44.92%,其中显著上升仅占 6.45%;2000 年以后,相较之前,黄土高原植被 NDVI 迅速上升,上升区域面积达到总面积的 91.90%,显著上升为 65.78%。

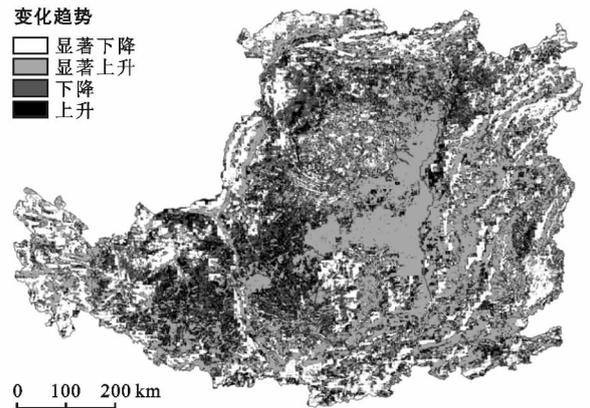


图 3 黄土高原 1990—2015 年生长季 NDVI 显著性变化分布

表 2 各时间段黄土高原生长季 NDVI 变化类型像元个数及百分比

变化	1990—2015 年		1990—1999 年		2000—2015 年	
	像元数/个	比例/%	像元数/个	比例/%	像元数/个	比例/%
显著上升	206 129	33.05	40 202	6.45	410 252	65.78
显著下降	153 485	24.61	31 067	4.98	10 302	1.65
上升	127 219	20.40	239 937	38.47	162 891	26.12
下降	136 822	21.94	312 449	50.10	40 210	6.45

2.2 黄土高原地区植被面积变化特征

黄土高原地区植被面积总体表现为增加趋势(表 3),林地主要分布在黄土高原的南部和东部地区,陕西和山西省境内,草地分布于黄土高原的大部分区域(附图 2)。

林地自 1990 年开始一直表现为持续增加,且

2000 年之后增加速度较快,2000—2005 年林地的净变化率达到 0.31%,之后减慢,但是仍快于 2000 年以前,直到 2010,林地面积开始有轻微减少。草地面积 2000 年以前总体表现为减少,净变化率为 -0.10%,之后表现为与林地相同的变化趋势,2000—2005 年面积的增加速度较快。

表 3 黄土高原植被面积变化

类型	面积/km ²					净变化率/%			
	1990 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	1990—2000 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年
林地	126 039.78	126 285.65	128 613.85	129 870.80	129 637.11	0.02	0.31	0.16	-0.03
草地	230 887.19	228 391.86	235 166.71	239 083.15	238 644.53	-0.10	0.49	0.28	-0.03

1990—2000 年增加的林地主要来自于耕地的转入,面积为 470.73 km²,其次为草地和其他,面积分别为 68.46 和 68.86 km²;减少的草地主要转化为耕地,面积达到 4 104.05 km²,其次为人工表面,面积为 270.87 km²(表 4)。随着人口数量的增多,人工表面的迅速扩张,黄土高原地区的开荒行为持续增加,导致大量的草地被开垦为耕地,或退化为裸土等其他类型。

2000—2015 年,增加的林地和草地主要来自耕地

的转入,面积分别为 3 723.29 和 14 278.59 km²;此外还有大量的裸土等其他类型转入草地,面积达到 1 197.67 km²(表 4)。尽管城镇化进程持续加剧的行为会破坏植被,但是也导致农村农民对土地、山林的依赖性降低,大量农田撂荒,砍伐减小。加之随着退耕还林(草)生态工程的实施,大面积的退耕还林(草)、植树造林等一系列措施的实行都会导致黄土高原的植被面积持续增加。

表 4 黄土高原不同时期土地利用类型转移矩阵

时期	类型	林地	草地	耕地	湿地	人工表面	其他
1990—2000 年	林地	125 650.95	51.73	269.48	7.31	27.99	32.32
	草地	68.46	226 100.37	4 104.05	108.09	270.87	235.36
	耕地	470.73	1 320.95	20 3212.10	189.34	1 492.86	156.89
	湿地	25.53	228.58	925.75	3 772.63	23.56	394.82
	人工表面	1.13	0.12	0.00	0.24	14 495.65	0.00
	其他	68.86	690.11	1 479.75	142.60	90.63	37 506.82
2000—2015 年	林地	125 513.66	100.06	284.09	20.97	299.66	67.20
	草地	240.44	222 833.81	1 930.85	300.52	2 563.69	522.55
	耕地	3 723.29	14 278.59	186 047.50	621.99	4 838.25	481.51
	湿地	35.09	228.15	316.92	3 299.38	74.44	266.22
	人工表面	5.19	6.26	1.76	1.69	16 382.39	4.26
	其他	119.43	1197.67	498.64	347.31	486.48	35 676.69

2.3 植被对气候变化和人类活动的响应

通过改进的残差趋势分析得到,人类和气候共同引起植被恢复的区域主要分布在黄土高原的中部,主要集中在陕西的北部,占总面积的 9.41%;人类引起植被恢复的区域主要分布在内蒙古的东部和北部、甘肃和宁夏的南部,以及陕西和山西省的中部地区,占总面积的 21.74%;气候引起植被恢复的区域仅占总面积的 1.91%,主要分布于青海省。人类和气候共同引起的植被退化主要分布在内蒙古、山西和宁夏的北部,占总面积的 4.71%;人类引起的植被退化面积占 11.99%,主要分布于内蒙古的西北部、山西和陕西省的部分地区;气候引起的植被退化主要分布于青海和甘肃省(图 4,表 5)。

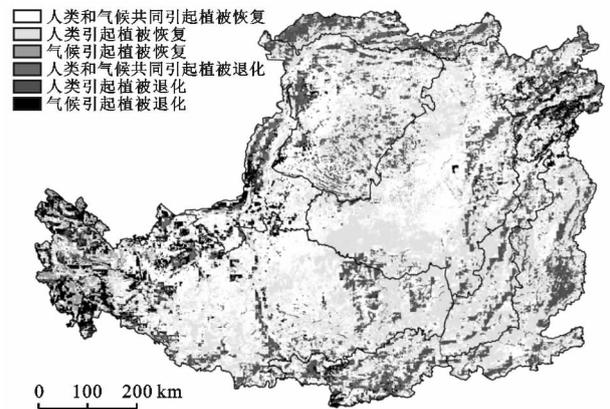


图 4 黄土高原 1990—2015 年植被显著恢复和显著退化区域分布

表 5 黄土高原 1990—2015 年生长季 NDVI 变化驱动因素解析

驱动因素	像元个数	比例/%
人类和气候共同引起植被恢复	58 667	9.41
人类引起植被恢复	135 569	21.74
气候引起植被恢复	11 893	1.91
人类和气候共同引起植被退化	29 346	4.71
人类引起植被退化	74 758	11.99
气候引起植被退化	49 381	7.92

对黄土高原植被主要受气候影响的区域进行进一步分析。气候引起植被变化区域的温度和降水有着相同的趋势,都呈上升趋势(图 5)。气温在过去 26 a 间升高幅度较大,且植被退化区域比恢复区域温度上升较快。降水变化趋势表现为轻微上升,且植被恢复区域较退化区域明显。

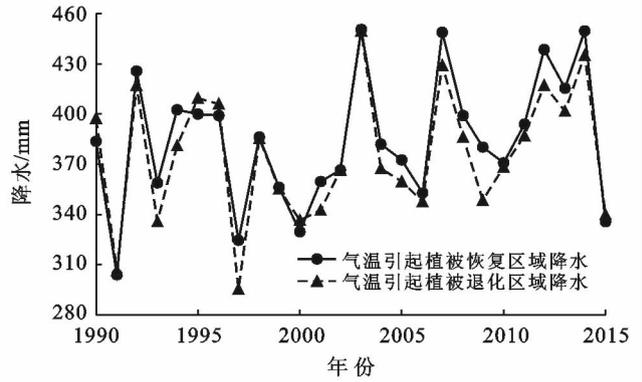
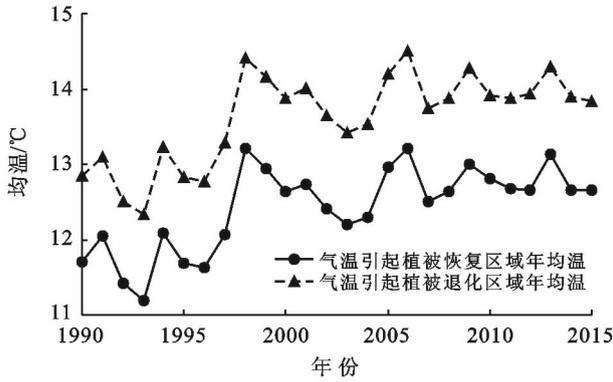


图 5 1990—2015 年气候引起植被恢复和退化区域的年均气温和年降水变化趋势

3 讨论与结论

1990—2015 年,黄土高原地区植被的 NDVI 总体表现为上升趋势,这一趋势与已有的研究结果一致^[8,32]。具体来说,1990—1998 年黄土高原的植被处于相对稳定的时期,之后植被 NDVI 迅速下降,2002 年植被 NDVI 进入迅速上升时期,这主要是由于随着气候干旱化趋势发展,植被 NDVI 表现为减少且幅度小,1999—2001 年降水明显偏少(图 6),导致植被 NDVI 减少,自 2002 年以来,随着降水量的恢复和退耕还林还草政策的大规模实施,植被 NDVI 呈现明显上升趋势^[4]。自 2000 年起,黄土高原植被面积表现为增加趋势,且主要来自于耕地的转入,这说明退耕还林(草)工程的实施,在黄土高原地区效果明显,不仅植被面积持续增加,而且生长状况也得到了改善。但值得注意的是,城镇化进程的加剧,虽然会破坏植被,但是也导致农村农民对土地、山林的依赖性降低,大量农田撂荒,砍伐减小,进而对黄土高原植被的恢复起到积极作用。

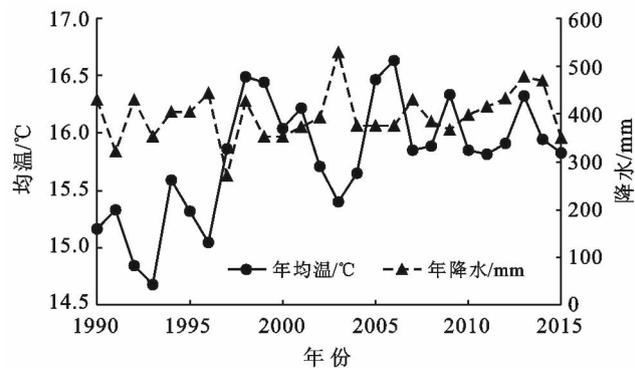


图 6 黄土高原地区 1990—2015 年生长季年均温度和年降水变化图

26 a 间黄土高原植被 NDVI 整体呈现的上升趋势,显著上升的区域主要集中在中部和东部地区。结

合人类残差分析的结果得知,黄土高原植被恢复的原因主要是气候和人类共同影响,且人类影响的程度较大,区域占总面积的 21.74%,本研究中大量耕地转入草地印证这一结果。结合李双双等^[11]的研究可知,陕北地区 2000—2009 年退耕还林(草)面积为 $9.81 \times 10^5 \text{ hm}^2$,榆林、延安退耕还林还草面积分别为 $3.09 \times 10^5 \text{ hm}^2$, $2.91 \times 10^5 \text{ hm}^2$,也说明中东部地区的植被恢复主要得益于生态工程的实施。人类引起植被退化的区域主要是由于城镇化扩张。罗娟等^[33]对毛乌素沙地近 10 a 的土地利用动态变化进行了分析,发现居民地和工矿用地面积增加,且主要是由草地转入;马瞳宇等^[34]选取黄土高原风蚀水蚀交错区典型代表流域进行分析,1990—2010 年期间,该地区煤矿开采活动活跃,影响流域内林草生长,并对侵蚀环境的人为恶化起着巨大的促进作用;卞鸿雁等^[15]发现 1980—2005 年黄土高原南部地区建设用地净增了 $1\,238.29 \text{ km}^2$ 。除了以上原因,对比黄土高原土地利用分布图可以看出,部分人类引起植被退化区域是耕地分布的区域,由于研究中所使用的遥感数据分辨率有限,不可避免的会将一些区域耕地的 NDVI 值的变化带入模型中,随着退耕政策的实施,导致耕地的减少,进而影响到最后的模拟结果。气候因素主导植被退化区域主要是由于气温升高较快,但降水增加不明显,加速了相应区域气候的暖干化,抑制了植被的生长。以上研究结果也侧面的验证了人类残差分析在黄土高原的有效性。

尽管本研究中使用 NDVI 相较其他长时间序列的 NDVI 产品具有更高的分辨率,但 1 km 的空间分辨率对于黄土高原地区而言仍然相对较低。在一些复杂的地形中,坡度和其他地形因素对植被的反射率有一定的影响,进而影响 NDVI 的观测值。此外,黄土高原所处的地理位置,使得当某一地区的植被稀疏时,植被变化趋于退化,这些退化或暴露的斑点可

能会影响遥感监测的反射率,进而影响 NDVI。

残差趋势分析法被广泛用于分离气候和人为因素对植被变化的影响^[35]。残差法以像素为分析单元,提出了一种充分考虑坡度,土壤和植被空间变异性对温度—降水—植被 NDVI 的影响的分析方法。然而,这种方法也有一些缺点^[36],潜在的降水—温度—NDVI 关系的趋势分析是基于相同的时间序列。由于遥感数据的限制,残差趋势法只能检测到遥感数据时间序列内的退化。考虑到影响植被 NDVI 变化的因素还有很多,比如蒸散量、土壤水分等,这些因素都需要在未来的研究中仔细考虑,进而改进模型。

[参 考 文 献]

- [1] 孙建国,张卓,韩惠,等. 气候和人类因素在黄土高原西北部植被变化中的贡献率研究[J]. 遥感信息,2014,29(2):83-88.
- [2] 周德成,赵淑清,朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响:以陕西省安塞县为例[J]. 自然资源学报,2011,26(11):1866-1878.
- [3] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. 中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- [4] 信忠保,许炯心,郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2007,37(11):1504-1514.
- [5] 彭珂珊. 黄土高原水土流失区退耕还林(草)的基本思路[J]. 水土保持研究,2000,7(2):164-171.
- [6] 王丹丹,吴普特,赵西宁. 黄土高原退耕还林(草)效益评价研究进展[J]. 西北林学院学报,2010,25(3):223-228.
- [7] 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[J]. 生态学报,2016,36(23):7594-7602.
- [8] 赵安周,张安兵,刘海新,等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J]. 自然资源学报,2017,32(3):449-460.
- [9] Zhou Zhengchao, Shangguan Zhouping, Zhao Duli. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau area of China [J]. Ecological Modelling, 2006, 198(1/2):263-268.
- [10] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(3):241-252.
- [11] 李双双,延军平,万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(7):960-970.
- [12] 高海东,庞国伟,李占斌,等. 1981—2012 年黄土高原植被覆盖度时空变化特征[J]. 中国水土保持,2016(7):52-56.
- [13] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4):535-554.
- [14] 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.
- [15] 卞鸿雁,庞奖励,任志远,等. 黄土高原南部土地利用/覆被变化的土壤侵蚀效应[J]. 水土保持通报,2013,33(2):11-16,4.
- [16] 高海东,庞国伟,李占斌,等. 黄土高原植被恢复潜力研究[J]. 地理学报,2017,72(5):863-874.
- [17] Guay K C, Beck P S, Berner L T, et al. Vegetation productivity patterns at high northern latitudes: A multi-sensor satellite data assessment [J]. Global Change Biology, 2014, 20(10):3147-3158.
- [18] Xu Yufeng, Yang Jing, Chen Yaning. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016,126(1/2):213-222.
- [19] Mao Dehua, Wang Zongming, Luo Ling, et al. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18:528-536.
- [20] Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Zheng Wei. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau(1981—2006): Impacts of climate changes and human activities [J]. Science in China Series (D): Earth Sciences, 2008, 51(1):67-78.
- [21] Sohom M, Roshan K S, Slobodan P S. Use of beta regression for statistical downscaling of precipitation in the Campbell River basin, British Columbia, Canada [J]. Journal of Hydrology, 2016(538):49-62.
- [22] 姜晓剑,刘小军,黄芬,等. 逐日气象要素空间插值方法的比较[J]. 应用生态学报,2010,21(3):624-630.
- [23] 张磊,吴炳方,李晓松,等. 基于碳收支的中国土地覆被分类系统[J]. 生态学报,2014,34(24):7158-7166.
- [24] Hulet A, Roundy B A, Petersen S L, et al. An object-based image analysis of pinyon and juniper woodlands treated to reduce fuels [J]. Environmental Management, 2014, 53(3):660-71.
- [25] Voltersen M, Berger C, Hese S, et al. Object-based land cover mapping and comprehensive feature calculation for an automated derivation of urban structure types at block level [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 154:192-201.
- [26] 荆玉平,张树文,匡文慧. 20 世纪 70 年代中期以来奈曼旗土地利用变化及生态环境效应研究 [J]. 干旱区资源与环境,2008,22(3):20-25.

- 村经济,2013(12):72-83.
- [2] 封志明,孙通,杨艳昭. 2003—2013 年中国粮食增产格局及其贡献因素研究[J]. 自然资源学报,2016,31(6):895-907.
- [3] 张志高,娄延军,张玉,等. 2003—2015 年河南粮食增产格局及贡献因素研究[J]. 中国农业资源与区划,2018,39(6):28-34.
- [4] 《中国土地资源生产能力及人口承载力研究》课题组. 中国土地资源生产能力及人口承载力研究[M]. 北京:中国人民大学出版社,1991.
- [5] 封志明,李香莲. 耕地与粮食安全战略:藏粮于土,提高中国土地资源的综合生产能力[J]. 地理学与国土研究,2000,16(3):1-5.
- [6] 李谷成,范丽霞,闵锐. 资源、环境与农业发展的协调性:基于环境规制的省级农业环境效率排名[J]. 数量经济技术经济研究,2011(10):21-36.
- [7] 饶静,纪晓婷. 微观视角下的我国农业面源污染治理困境分析[J]. 农业技术经济,2011(12):11-16.
- [8] 李秀芬,朱金兆,顾晓君,等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(4):81-84.
- [9] Pasqual J, Souto G. Sustainability in natural resource management[J]. *Ecological Economics*, 2003,46(1):47-59.
- [10] 杨建辉. 农业经济增长的农业化学化效应及时空格局变化:以山东省为例[J]. 经济地理,2017,37(3):182-187.
- [11] 何春花. 河南省粮食生产影响因素的量化分析与对策[D]. 河南 郑州:河南农业大学,2009.
- [12] 陆钟武,王鹤鸣,岳强. 脱钩指数:资源消耗、废物排放与经济增长的定量表达[J]. 资源科学,2011,33(1):2-9.
- [13] Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. *Transport Policy*, 2005,12(2):137-151.
- [14] 张志高,袁征,刘雪,等. 基于投入视角的农业碳排放与经济增长的脱钩效应分析:以河南省为例[J]. 水土保持研究,2017,24(5):272-278.
- [15] 张玉梅,乔娟. 都市农业发展与碳排放脱钩关系分析:基于脱钩理论的 Tapio 弹性分析法[J]. 经济问题,2014(10):81-86.
- [16] 徐卫涛,张俊飏,李树明,等. 我国循环农业中的化肥施用与粮食生产脱钩研究[J]. 农业现代化研究,2010,31(2):200-203.
- [17] Ma C, Stern D I. China's changing energy intensity trend: A decomposition analysis [J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2008,30(3):1037-1053.
- [18] Kaya Y. Impact of Carbon Dioxide Emission on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios [R]. Paris: Presentation to the Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, IPCC, 1989.
- [19] Ang B W, Liu Na. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach[J]. *Energy Policy*, 2007,35(1):238-246.

(上接第 221 页)

- [27] 幸赞品,颜长珍,冯坤,等. 1975—2015 年宁夏生态系统格局宏观变化分析[J]. 生态学报,2018,38(22):1-8.
- [28] Liu Yanlan, Lei Huimin. Responses of natural vegetation dynamics to climate drivers in China from 1982 to 2011 [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8):10243-10268.
- [29] 卓莉,曹鑫,陈晋,等. 锡林郭勒草原生态恢复工程效果的评价[J]. 地理学报,2007,62(5):471-480.
- [30] 曹鑫,辜智慧,陈晋,等. 基于遥感的草原退化人为因素影响趋势分析[J]. 植物生态学报,2006,30(2):268-277.
- [31] Tian Haijing, Cao Chunxiang, Chen Wei, et al. Response of vegetation activity dynamic to climatic change and ecological restoration programs in Inner Mongolia from 2000 to 2012 [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82(4):276-289.
- [32] 张翀,任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J]. 资源科学,2011,33(11):2143-2149.
- [33] 罗娟,银山,王永芳. 毛乌素沙地土地利用动态变化分析[J]. 内蒙古林业科技,2014,40(2):5-9.
- [34] 马瞳宇,张晓萍,马芹,等. 近 20 年来黄土高原水蚀风蚀交错区典型小流域土地利用/覆被变化分析[J]. 中国水土保持科学,2012,10(3):9-14.
- [35] Fensholt R, Rasmussen K, Kaspersen P, et al. Assessing land degradation/recovery in the African Sahel from long-term earth observation based primary productivity and precipitation relationships [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(2):664-686.
- [36] Wessels K J, Prince S D, Zambatis N, et al. Relationship between herbaceous biomass and 1-km² advanced very high resolution radiometer (AVHRR) NDVI in Kruger National Park, South Africa [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 27(5):951-973.