

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.044.

张芳宁, 杨亮洁, 杨永春. 1981—2016年黄土高原植被NDVI变化及对气候和人类活动的响应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 230-237.

ZHANG Fangning, YANG Liangjie, YANG Yongchun. Change of Vegetation NDVI and Its Response to Climatic and Human Activities in the Loess Plateau During 1981—2016[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 230-237.

1981—2016年黄土高原植被NDVI变化及对气候和人类活动的响应

张芳宁¹, 杨亮洁¹, 杨永春^{2,3}

(1.西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070;

2.兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 3.兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 探析黄土高原植被覆盖演变及其驱动因素, 有助于了解黄土高原生态现状, 剖析植被变化和驱动因素, 以期为区域生态环境治理和规划提供科学依据。基于黄土高原 NDVI、气温、降水数据, 采用变化趋势率分析、多元回归残差分析等方法, 研究了 1981—2016 年黄土高原区植被 NDVI 变化特征及对气候和人类活动的响应。结果表明: (1) 1981—2016 年, 黄土高原区植被 NDVI 呈东南高西北低的空间格局, 整体上升率高, 生态恢复效果显著; 在选择的 45 个地州市中, 榆林、铜川、延安和渭南等地植被 NDVI 增加最快, 兰西城市群和内蒙古部分区域植被呈减小趋势。(2) 气候变化和人类活动的共同作用是近 35 年来黄土高原区植被 NDVI 整体快速增加和巨大空间差异的主要原因。气候变化对黄土高原 NDVI 变化的影响主要以轻微促进和适度促进为主, 而农村人类活动、城市人类活动的影响主要为明显抑制和轻微抑制。(3) 气候变化、农村人类活动和城市人类活动对黄土高原区植被 NDVI 增加的贡献率分别为 82.03%、11.68% 和 6.29%; 气候变化贡献率大于 60% 的区域占黄土高原的 76.9%, 主要集中在黄土高原的东部和中部, 人类活动对 NDVI 的影响主要是生产生活活动所导致, 农村人类活动贡献率大于 60% 的区域占黄土高原的 0.29%, 分布在黄土高原南部, 城市人类活动的贡献率均小于 60%; 气候变化贡献率大于 50% 的地州市有 44 个, 郑州、宝鸡和呼和浩特市的气候变化贡献率最大。综上, 黄土高原植被呈现东南高西北低的特征, 生态环境恢复效果显著, 气候变化对植被的恢复以促进作用为主, 而人类活动抑制作用明显。研究表明应该更加重视人类在植被恢复中的作用, 为生态环境的治理和绿色发展提供参考。

关键词: 植被变化; 黄土高原; 气候变化; 人类活动; 响应

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0230-08

Change of Vegetation NDVI and Its Response to Climatic and Human Activities in the Loess Plateau During 1981—2016

ZHANG Fangning¹, YANG Liangjie¹, YANG Yongchun^{2,3}

(1.College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070,

China; 2.College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3.Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Exploring the evolution of vegetation cover and its drivers on the Loess Plateau can help to understand the ecological status, dissect vegetation changes and drivers. In order to provide a scientific basis for ecological environmental management and planning, based on the data of NDVI, temperature and precipitation in the Loess Plateau, the changing of vegetation NDVI and its response to climate and human activities in the Loess Plateau during 1981—2016 were distinguished by using the methods of trend analysis and multiple

收稿日期: 2021-12-07

修回日期: 2021-12-17

资助项目: 国家自然科学基金青年项目(41501176); 国家自然科学基金地区项目(41961030)

第一作者: 张芳宁(1998—), 女, 甘肃静宁人, 硕士研究生, 主要从事城市发展与城市规划研究。E-mail: zfn66808@163.com

通信作者: 杨亮洁(1977—), 女, 甘肃静宁人, 博士, 副教授, 主要从事经济地理、城市地理、城市空间组织、城市网络和生态网络方面的研究。

E-mail: yangljmnnx@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

regression residuals analysis. The results showed that: (1) during 1981—2016, the overall vegetation cover in the Loess Plateau was low, but the increase was high and ecological restoration was remarkable; the spatial pattern of vegetation NDVI was high in the southeast and low in the northwest in the Loess Plateau during 1981—2016, with a high overall increase and remarkable ecological restoration effect; Lanzhou-Xining urban agglomeration and some regions of Inner Mongolia were the areas with a decrease on NDVI in the selected 45 prefectures and cities, while the vegetation NDVI in Yulin, Tongchuan, Yan'an and Weinan increased much faster compared with other regions; (2) the climatic change and human activities drove the NDVI change jointly as main forces in the Loess Plateau in recent 35 years and induced both a rapid increasing trend on the whole and a huge spatial difference; the impact of climate change on NDVI in the Loess Plateau was mainly slightly promoted and moderately promoted, while the impacts of rural human activities and urban human activities was main inhibition and slight inhibition; (3) the contributions of climatic change, human activities in rural and urban areas to the increase of NDVI in the Loess Plateau accounted for 82.03%, 11.68% and 6.29%, respectively; the regions where the contribution rates of climatic change were more than 60% mainly distributed in the eastern and central parts of the Loess Plateau; the impact of human activities on NDVI was mainly caused by production and living activities, there were 0.29% regions where the contribution rates of rural human activities were more than 50% mainly distributed in the south of the Loess Plateau, the contribution rate of urban human activities was less than 60%; There were 22 prefectures and cities where the contributions of climatic change were more than 50%, and the contributions induced by climatic change in Zhengzhou, Baoji, and Hohhot were much greater than those of any other regions. In summary, the vegetation coverage on the Loess Plateau showed a characteristic of high level in the southeast and low level in the northwest, with significant ecological and environmental restoration effects. Climate change had been having a facilitative effect on the recovery of vegetation, while the inhibiting effect of human activities was evident. This study suggested that more attention should be paid to the role of humans in vegetation restoration, and provided a reference for ecological environment management.

Keywords: vegetation change; Loess Plateau; climatic change; human activities; response

党的十九大以来,在习近平总书记生态文明思想的指导下,党中央、国务院对生态文明建设和生态环境保护工作进行重点部署,提出建设美丽中国的新目标^[1-2]。植被是生态环境变化的综合指示器^[3],具有连接大气、土壤和水文等生态要素的作用,可为自然生态系统和人类生产生活提供强有力的保障^[3-5]。区域植被变化是气候和人类活动共同作用的结果^[6],两者均能对植被变化产生正面和负面的影响。气温和降水通过有效积温和可用水分来调控植物光合作用、呼吸作用及土壤有机碳分解等进而影响植物的生长和分布^[3,6-7],是影响植被生长发育的关键因子。人类活动对植被的影响主要表现为土地利用类型的转变。近年来,对大尺度、长时期的植被变化进行监测和归因分析已成为全球变化研究的重要内容,并可为制定合理的土地利用及生态环境保护策略提供科学依据^[8-9]。

归一化指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)可以有效反映区域植被生长状况,是监测区域生态系统和植被变化的有效指标^[10]。国内外学者基于NDVI数据,利用多元回归残差分析^[11]、地理探测器^[12]、

变化趋势分析^[13]、全色图锐化^[14]、干旱指数计算^[12,15]、评估优先权重影响等^[16]方法来研究植被覆盖变化、植被空间分布特征、植被变化的驱动因素、气候对植被变化的影响、土地覆盖的不同类型植被以及NDVI与植被健康指数的关系等^[3,4,11-16]。1997年Myneni等首次利用NDVI数据集研究了1981—1991年22.75°N以北地区植被覆盖动态变化,得出北半球植被覆盖度近十年呈增加趋势^[17]。中国植被变化的研究也取得丰硕的成果,主要集中在青藏高原^[18]、黄土高原^[19]等生态脆弱区以及东北^[20]和华北^[21]等人类活动密集区。植被覆盖整体呈现增加趋势,植被变化和气候呈弱正相关关系且降水影响大于气温^[18,22];2002—2015年黔桂喀斯特山区气候变化是植被变化的关键因素,贡献率达到95%^[23];黄土高原植被NDVI自西北向东南递增,大部分地区植被呈现增加趋势且不同植被对水热条件滞后性不一^[24-25]。以往的研究中,不同学者采用不同的方法、不同数据来源的NDVI数据且时间序列短,得到的结果差异较大^[17]。另外,以往研究常采用相关分析等^[18]方法,针对区域植被长期变化及驱动力

的研究中对气候变化、土壤等自然因素研究居多,对人类活动响应的研究相对较少,特别是将人类活动细分为城市人类活动和农村人类活动进行定性定量相结合分析的研究甚是鲜见。因此,开展黄土高原区长时段植被变化的归因研究和相应贡献的量化具有重要的理论和现实意义。

黄土高原位于内陆腹地,北部沙漠广布,生态系统脆弱,是典型的生态环境脆弱区和国家生态恢复重点区^[26-27],在维护生态系统平衡和生态建设中具有举足轻重的地位^[28]。基于此,本文基于黄土高原区74个地面气象站的气温、降水资料以及具有长时间序列的SPOT/VEGETATION、GIMMS植被指数数据集,表征黄土高原地区1981—2016年植被覆盖动态变化;从降水和气温两个方面分析气候对植被变化的影响,从城市和农村两个视角建立人类活动对植被覆盖度影响的指标体系,采用变化趋势分析和多元回归残差分析等方法探讨1981—2016年黄土高原区植被NDVI变化的基本特征及其对气候变化和人类活动的响应,并对两种驱动因素的相对贡献进行评估,以期为黄土高原生态脆弱区改善环境和经济可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

黄土高原位于黄河中上游,介于 $33^{\circ}43'—41^{\circ}16'N$, $100^{\circ}54'—114^{\circ}33'E$,东起太行山,西至青海日月山,南界秦岭,北抵鄂尔多斯高原,平均海拔 $500\sim 2\,000\text{ m}$,面积约 64 万 km^2 ,横跨河南、青海、宁夏、甘肃、陕西、山西、内蒙古7个省份,包括西安等45个地州市。黄土高原自东向西横贯半湿润、半干旱气候区,植被类型自西北向东南呈带状分布,由东南向西北依次为暖温带夏绿阔叶林、森林草原、干草原及中温带荒漠草原,植被类型多样。随着气候干暖化和关中城市群、晋中城市群、兰西城市群等快速发展,1980—2016年乡镇人口规模不断增加^[29],黄土高原经济发展带来的资源、环境等问题随之而来。整体上,黄土高原西北部的植被覆盖度远低于东南部地区(图1)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

2.1.1 数据来源 NDVI数据:本文所用植被NDVI数据来源于不同网站,杜加强等^[30]、信忠保等^[31]和金凯^[32]通过对比分析等方法对两种数据集的一致性进行检验,两种数据具有显著一致性,应用其研究黄土高原的植被变化具有一定的合理性。1981—2006年的中国地表NDVI数据产品“GIMMS NDVI3gV1.0数据集”来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>),空间分辨率为 8 km ,时间分辨率为 15 d 。2006—2016年NDVI数据是SPOT/VEGETATION NDVI数据,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/DOJ>),空间分辨率为 1 km ,时间分辨率为 10 d 。该数据集对厄尔尼诺等异常气候情况进行了校正,利用最大值合成法消除云量和火山岩气溶胶等的影响。

气候数据:气温、降水数据来源于中国气象数据共享服务网《中国地面气候资料日值数据集(V 3.0)》(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)。该数据集包含除香港、澳门和台湾以外的中国近700个地面基准气象站自1951年以来的气温、降水等要素的逐日数据。该数据质量通过严格把控,数据实有率在99%以上,正确率接近100%。本文主要采集研究区内的74个气象站点的月总降水和月平均气温数据。

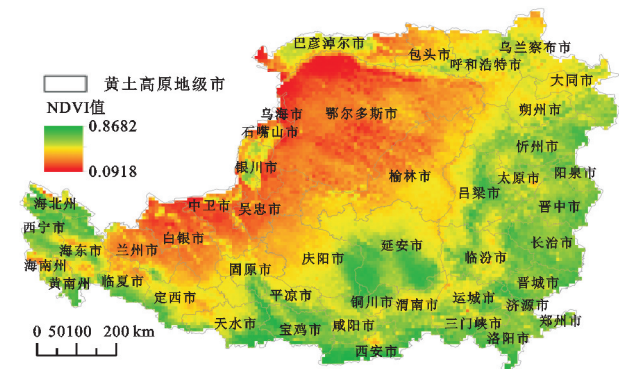


图1 黄土高原区植被覆盖状况

人类活动数据:来源于《甘肃省统计年鉴》、《宁夏统计年鉴》、《陕西省统计年鉴》、《山西省统计年鉴》、《内蒙古统计年鉴》、《青海省统计年鉴》、《河南省统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》,部分数据利用插值法和回归法进行补缺。

2.1.2 数据预处理 对1981—2006年GIMMS NDVI3gV1.0数据集进行数据裁剪、投影转换、月和年最大值合成以及真值计算。对2006—2016年SPOT/VEGETATION NDVI卫星遥感数据进行数据裁剪、分辨率转换、月和年最大值合成及真值计算。

气象数据的处理主要包括气象站点的筛选、空间数据的插值以及影像数据裁剪。

社会经济数据由于1981年大部分地区的数据无法获取,只收集了1985—2016年人类活动各项指标数据。首先对各指标缺失数据进行补缺。缺失数据的数量仅占总数据的0.64%,对分析结果的影响可以忽略不计。最后利用极值标准化对社会经济数据进行无量纲处理。

2.2 研究方法

2.2.1 线性回归法 利用一元线性回归法^[16]计算植被

NDVI 变化趋势,研究年际植被变化趋势,计算公式为:

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

(1)

式中:slope 为 NDVI 的趋势斜率;NDVI_{*i*} 为第 *i* 年的年植被指数;*n* 为年数;*i* 为时间变量。

2.2.2 植被 NDVI 变化对气候变化和人类活动响应的判定

(1) 人类活动影响指标体系构建。城市人类活动与农村人类活动对植被 NDVI 的影响方式不同。城市

表 1 人类活动对植被覆盖度影响指标体系

准则层	指标层	权重								
		1985 年	1989 年	1993 年	1997 年	2001 年	2005 年	2009 年	2013 年	2016 年
农村人类活动	农作物播种面积	0.11	0.12	0.12	0.10	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10
	灌溉面积	0.15	0.17	0.17	0.18	0.20	0.17	0.19	0.19	0.18
	化肥施用量	0.18	0.14	0.16	0.22	0.19	0.24	0.20	0.24	0.22
	牲畜存栏数	0.16	0.15	0.15	0.15	0.13	0.16	0.19	0.20	0.18
	园林绿地面积	0.32	0.34	0.31	0.28	0.29	0.26	0.24	0.26	0.26
城市人类活动	第二产业产值	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.006	0.02
	第三产业产值	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02
	建设用地面积	0.06	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.004	0.02

(2) 植被覆盖变化对气候变化和人类活动响应的判定。利用公式(1)计算气候变化和人类活动影响下植被变化的趋势率。若趋势率为正表明驱动因素对植被恢复有促进作用,相反驱动因素抑制植被恢复。为了更好地分析气候变化和人类活动对植被的影响,借鉴金凯等^[11]学者的判定标准,将影响程度分为 7 个等级,将黄土高原植被变化驱动力因素进行分类并计算其对植被覆盖度的贡献率。

2.2.3 多元回归残差分析 利用多元回归残差法分析气候变化和人类活动对植被 NDVI 的驱动力因素和贡献率^[3,16]。公式如下:

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

(2)

$$\text{NDVI}_{\text{HA}} = \text{NDVI}_{\text{Obs}} - \text{NDVI}_{\text{CC}}$$

(3)

$$\text{NDVI}_{\text{R}} = W_1 \text{NDVI}_{\text{HA}}$$

(4)

$$\text{NDVI}_{\text{U}} = W_2 \text{NDVI}_{\text{HA}}$$

(5)

式中:NDVI_{Obs}, NDVI_{CC}, NDVI_{HA} 分别为实际观测、气候变化和人类活动影响下 NDVI 值;*a*, *b*, *c* 为模型参数;*T*, *P* 为气温和降水量;NDVI_R, NDVI_U 分别是农村和城市人类活动影响下的 NDVI 值;*W*₁, *W*₂ 为农村和城市人类活动权重。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖时空演变特征

1981—2016 年黄土高原植被 NDVI 呈现波动上升趋势,生态恢复效果显著(图 2)。1981—1990 年整体先

人类活动对植被的影响主要表现在城镇化方面,包括城市化过程中林地转化为建设用地、住宅地和工业用地等;农村人类活动主要通过农业发展影响生态环境,包括农作物种植、畜牧业发展、林地开垦等。因此,根据已有研究^[33],结合人类活动对植被恢复的影响,从城市和农村两个领域构建人类活动对植被 NDVI 影响的评价指标体系(表 1),通过熵权法客观赋值城市人类活动和农村人类活动对植被 NDVI 的影响权重。赋值结果显示农村人类活动对植被 NDVI 的影响程度大于城市人类活动,而且这种趋势不断增强。

增加后降低,1991—1997 年缓慢增加,受降水量的影响在 1997 年出现小峰值,1998—2005 年呈减小趋势,2006—2013 年增加较快,2013—2016 年有所下降。黄土高原 NDVI 的年际增加速率为 0.005 4 a⁻¹,年均 NDVI 上升率为 0.016 4 a⁻¹,表明黄土高原植被恢复较为明显。NDVI 最小和最大值分别出现在 1989 年、2013 年,从联合国粮农组织的评估资料显示 1989 年全球森林损失 995 万 hm²,主要原因为人类破坏;我国于 2013 年将生态文明建设纳入中国特色社会主义事业“五位一体”总体布局^[2,34],强调绿色低碳循环发展,实施以改善环境质量为核心的工作,对生态恢复有一定影响。

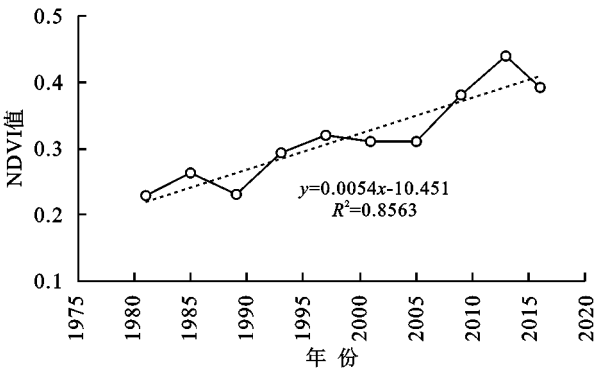


图 2 黄土高原地区年均 NDVI 年际变化趋势

黄土高原地区月平均 NDVI 演变整体呈倒 U 型,1—8 月呈明显的增加趋势,8—12 月显著下降(图 3)。植被指数从 3 月份开始快速增加,8 月达到最大

值 0.48,之后快速下降在 2 月份呈现最小值(0.204),这与黄土高原区物候生长规律一致。

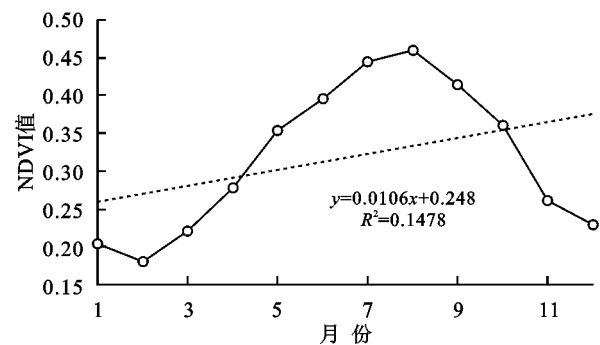


图 3 黄土高原区月均 NDVI 变化曲线

1981—2016 年黄土高原植被恢复效果显著,NDVI、变化趋势具有很大的空间异质性。黄土高原区植被 NDVI

东南明显高于西北,且季节性明显(图 4,图 5)。黄土高原的西北部属于干旱半干旱区,干燥少雨,植被生长条件比较恶劣,植被覆盖度低;东南部位于半湿润区,气候温暖湿润,土壤条件良好,植被覆盖度较高。春、夏、秋季植被 NDVI 值明显高于冬季,植被生长期明显。黄土高原 NDVI 呈增加趋势的像元占总像元的 91.5%,呈减小趋势的面积约占 8.5%。年度 NDVI 增加较快($\text{slope} \geq 5 \times 10^{-3} \text{ a}^{-1}$)的地区主要分布在气候条件较为湿润的东部及东南部。另外,内蒙古等地作为国家生态工程区,由于天保工程、京津风沙源治理工程的实施,植被 NDVI 增加明显;年度 NDVI 减小($\text{slope} \leq 0$)的地区分布在黄土高原西北部和人类活动较频繁的中心城区,减小趋势缓慢,集中在 $-1 \times 10^{-3} \sim 0 \text{ a}^{-1}$ 。

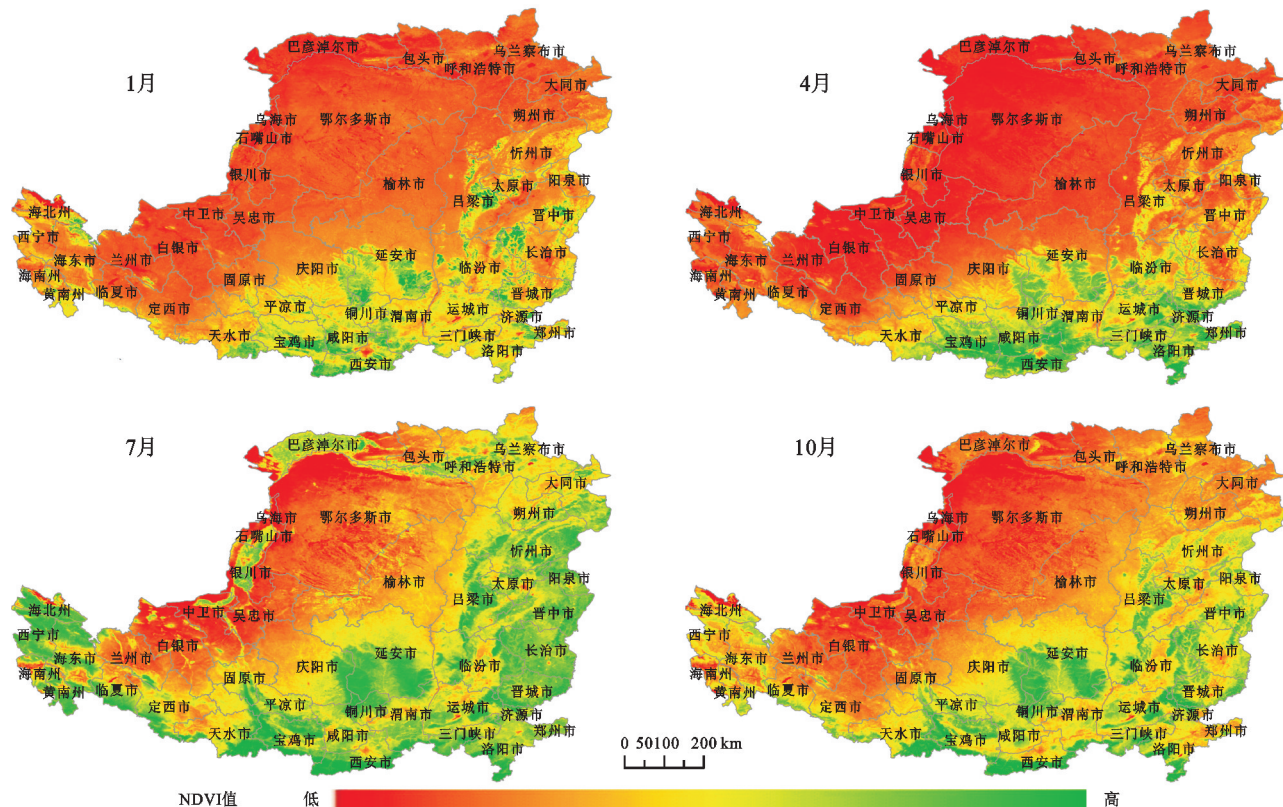


图 4 黄土高原 NDVI 多年时空演变

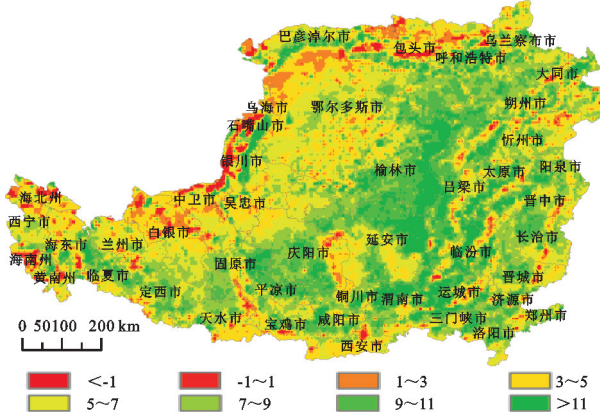


图 5 1981—2016 年黄土高原 NDVI 变化趋势空间分布

3.2 植被对气候变化和人类活动的响应

气候变化和人类活动对植被 NDVI 的影响存在空间异质性,两种因素对黄土高原区植被变化的作用具有很大的差异,城市人类活动和农村人类活动对植被覆盖的影响具有一致性(图 6)。黄土高原约有 90%的地区显示气候变化对植被恢复具有促进作用,主要分布在黄土高原区的中、东部,表明气温和降水共同作用促进植被恢复;轻微抑制和基本无影响的区域仅占 9%,可能是地形、土质以及气候共同作用的结果,主要分布于兰西城市群。

人类活动对植被恢复起促进作用的区域占黄土高

原的 48.5%，其中中度和明显促进的地区约占 39.8%，在黄土高原中部，特别是生态环境优美、农业历史悠久的陕北地区，城市人类活动和农村人类活动对植被恢复都有明显的促进作用；农村、城市人类活动对 NDVI 增加起促进作用的区域分别为 32.8% 和 18.5%，具有抑制作用的地区分别占 50.3% 和 52.2%，主要分布在兰西城市群和农业发达的中原地区；相比于气候变化的影响，人类活动对植被的抑制作用较明显。

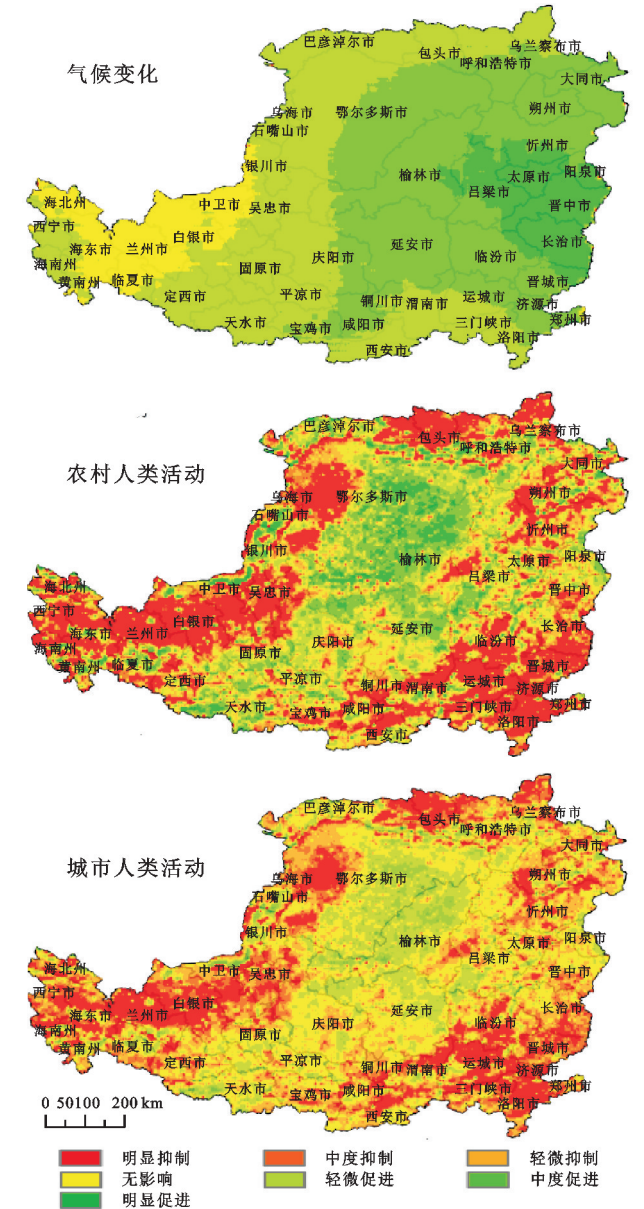


图 6 1981—2016 年气候变化和人类活动对黄土高原植被恢复的影响

图 7 表明，气候变化和人类活动的共同作用是 NDVI 增加的主要因素，约占黄土高原 50.7%，主要分布在黄土高原中部和南部，包括 23 个地州市；气候变化作用下 NDVI 增加的区域约占黄土高原的 40.66%，主要分布在黄土高原东部和西北部；而人类活动导致 NDVI 增加的区域约占 0.05%。另外，有 0.01% 的地

区在气候变化和人类活动共同作用下导致植被减少，单独由人类活动导致 NDVI 减少的面积占黄土高原的 8.56%，零散分布在整个黄土高原。

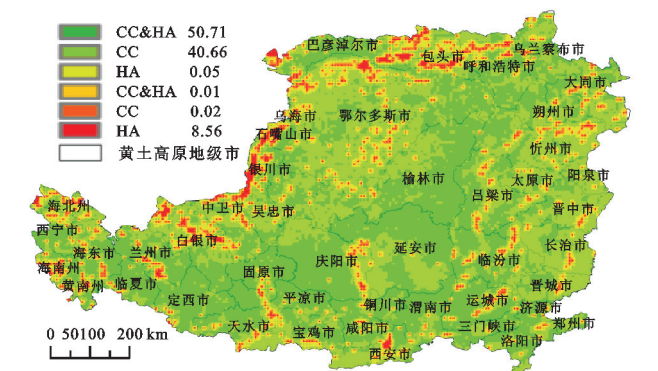


图 7 1981—2016 年黄土高原 NDVI 变化的驱动因素空间分布

3.3 驱动力因素对植被 NDVI 变化的相对贡献率

气候变化和人类活动对植被恢复的贡献率在空间上存在一定一致性，但气候变化的贡献率明显高于人类活动(图 8)。气候变化对植被 NDVI 贡献率以正向作用为主，约有 49.16% 的区域贡献率大于 80%，主要分布在黄土高原中北部和东部；气候变化贡献率在 40%~80% 的区域占黄土高原的 42.25%，呈带状分布在黄土高原的南部和中部。农村人类活动和城市人类活动对 NDVI 的贡献率多集中在 0%~20%，贡献率在 40%~80% 的区域分别为 6.07% 和 0.01%，城市人类活动对植被恢复的贡献率均小于 60%。

市域尺度上，黄土高原区 45 个地州市气候变化和人类活动对植被覆盖的贡献差异显著(图 9)。气候因素是植物生长分布的基础，人类活动的影响主要以生产生活的负面因素为主进行指标体系的构建，结果显示，气候变化对 NDVI 变化的贡献率为 49.8%~99.1%，气候变化贡献率超过 50% 的市有 44 个，黄土高原区气候变化对植被的影响明显大于人类活动。人类活动对植被 NDVI 的贡献率为 0.82%~50.19%，农村人类活动的贡献率为 0.53%~32.62%，城市人类活动的贡献率为 0.28%~17.56%。气候变化对植被贡献率最大的是较为湿润的郑州市，人类活动对植被贡献率最大为临夏市，其次为固原市。

4 结论

本文基于 SPOT/VEGETATION NDVI, GIMMS NDVI3gV1.0 数据和黄土高原区 74 个气象站的地表气温和降水观测资料，采用变化趋势率分析、多元回归残差分析等方法研究 1981—2016 年黄土高原区植被 NDVI 变化特征及其对气候和人类活动的响应。结论如下：

和人类活动对植被 NDVI 的影响,缺乏对地形条件和土壤状况的探究。在下一步的研究中,针对植被覆盖与气候和人类活动相关性不高的区域将其他因素综合考虑,并将结果和其他资料进行对比验证^[35]。

参考文献:

[1] 张皓,赵岑,陈传忠,等.发达国家和地区生态环境监测发展经历对中国的启示[J].中国环境监测,2021,37(1):34-39.

[2] 吕忠梅.习近平法治思想的生态文明法治理论[J].中国法学,2021,38(1):48-64.

[3] 陈安,李景吉,黎文婷,等.2001—2018 年雅砻江流域植被 NDVI 时空动态及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2022,29(1):169-175,183.

[4] 沈关东,朱志梅,刘欢,等.基于 NDVI 的渭南市植被覆盖时空变化研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(S2):351-353.

[5] Kong D D, Zhang Q P, Singh V, et al. Seasonal vegetation response to climatic change in the northern hemisphere(1982—2013)[J]. Global & Planetary Change, 2016(148):1-8.

[6] 周伟.1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J].地理学报,2014,69(1):15-30.

[7] 田义超,梁铭忠.北部湾沿海地区植被覆盖对气温和降水的旬响应特征[J].自然资源学报,2016,31(3):488-502.

[8] Liu Y, Li Y, Li S, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: correlations with climate and human Factors[J]. Remote Sensing, 2015,7:13233-13250.

[9] 王一,郝利娜,赵美龄,等.2001—2018 年重庆植被 NDVI 变化及其对气候因子和人类活动的响应[J].水土保持研究,2021,28(5):222-229.

[10] 贾文雄,陈京华.1982—2014 年祁连山植被生长季 NDVI 变化及其对气候的响应[J].水土保持研究,2018,25(2):264-268.

[11] 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.

[12] 徐超璇,鲁春霞,黄绍琳.张家口地区生态脆弱性及其影响因素[J].自然资源学报,2020,35(6):1288-1300.

[13] 奚砚涛,徐勇,刘欣婷.2000—2013 年江苏省不同植被类型 NDVI 时空变化特征[J].水土保持研究,2016,23(1):86-91,2.

[14] Javan F D, Samadzadegan F, Mehravar S, et al. A review of image fusion techniques for pan-sharpening of high-resolution satellite imagery[J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021(171):101-117.

[15] 罗新兰,李英歌,殷红,等.东北地区植被 NDVI 对不同时间尺度 SPEI 的响应[J].生态学杂志,2020,39(2):412-421.

[16] Zhang H, Ma J Y, Chen C, et al. NDVI-Net: A fusion network for generating high-resolution normalized difference vegetation index in remote sensing[J]. Isprs Journal of Pho-

togrammetry and Remote Sensing, 2020,168:182-196.

[17] 谢宝妮.黄土高原近 30 年植被覆盖变化及其对气候变化的响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.

[18] 马维伟,孙文颖.尕斯库勒湖湿地植被退化过程中有机碳及相关土壤酶活性变化特征[J].自然资源学报,2020,35(5):1250-1260.

[19] 陈卓鑫,王文龙,郭明明,等.黄土高原沟壑区植被恢复对不同地貌部位土壤可蚀性的影响[J].自然资源学报,2020,35(2):387-398.

[20] 张莲芝,李明,吴正方,等.基于 SPOT NDVI 的中国东北地表植被覆盖动态变化及其机理研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(1):171-175.

[21] 张月丛,赵志强,李双成,等.基于 SPOT NDVI 的华北部地表植被覆盖变化趋势[J].地理研究,2008,27(4):745-754,973.

[22] 王强,张勃,戴声佩,等.基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化[J].资源科学,2011,33(8):1613-1620.

[23] 刘梁美子,占车生,胡实,等.黔桂喀斯特山区年 NDVI 变化的影响因素研究[J].地理科学进展,2019,38(11):1783-1792.

[24] 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.

[25] 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].生态学杂志,2020,39(5):1664-1675.

[26] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River basin[J]. Ecological Indicators, 2015,51:117-126.

[27] 穆少杰.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.

[28] 井梅秀,蔡福,王学江,等.三江源区植被覆盖度空间特征[J].干旱区资源与环境,2020,34(2):141-147.

[29] 吕敏娟,曹小曙.1980—2016 年黄土高原地区人口和可达性异速标度分析[J].地理科学进展,2020,39(11):1884-1897.

[30] 杜加强,舒俭民,赵晨曦,等.两代 AVHRR GIMMS NDVI 数据集的对比分析:以新疆地区为例[J].生态学报,2016,36(21):6738-6749.

[31] 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.

[32] 金凯.中国植被覆盖时空变化及其与气候和人类活动的关系[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.

[33] 杜加强,贾尔恒·阿哈提,赵晨曦,等.1982—2012 年新疆植被 NDVI 的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应[J].应用生态学报,2015,26(12):3567-3578.

[34] 杨亮洁,王晶,魏伟,等.干旱内陆河流域生态安全格局的构建及优化:以石羊河流域为例[J].生态学报,2020,40(17):5915-5927.

[35] 易浪,任志远,张翀,等.黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J].资源科学,2014,36(1):166-174.