

黄土高原植被覆被时空动态及其影响因素

逯金鑫¹, 周荣磊¹, 刘洋洋¹, 温仲明¹, 王利成², 郭倩¹, 杨玉婷¹, 陈思慧¹

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中科院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探究黄土高原植被覆被时空分布与动态变化及其与气候和人类活动的响应机制,基于趋势分析、偏相关性分析和残差分析等方法,利用 2000—2015 年黄土高原 MODNDIT/NDVI 植被遥感数据、同期气象数据及 ESA CCI-LC 植被覆被分类数据,根据气候和人为因素对植被覆盖变化的驱动贡献,(1)分析了黄土高原 NDVI 分布格局、变化趋势及其驱动因素。结果表明:(1)黄土高原 NDVI 由西北向东南呈递增趋势,具有明显空间异质性分布特征。16 年间 NDVI 呈显著增加趋势,平均递增速率 0.010 2/a,波动范围介于 0.54~0.71。(2)黄土高原 NDVI 变化趋势与降水有较强相关性,两者偏相关系数为 0.53。(3)黄土高原不同季节 NDVI 均呈整体增长趋势,春季 NDVI 与降水呈显著正相关关系,降水是决定春季所有植被类型覆盖变化的最直接因素。(4)残差分析表明,人类活动对黄土高原 NDVI 的波动影响较大,是黄土高原植被覆盖变化的重要驱动因素。综上,黄土高原 16 年间植被覆被明显增加,降雨是黄土高原植被生长发育的主要限制因素,人类活动通过退耕还林等生态修复措施对黄土高原植被覆被带来明显改善。

关键词:植被动态; 驱动因素; NDVI; 黄土高原

中图分类号:Q948; TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0211-09

Temporal and Spatial Dynamics of Vegetation Cover on the Loess Plateau and Its Influencing Factors

LU Jinxin¹, ZHOU Ronglei¹, LIU Yangyang¹, WEN Zhongming¹,
WANG Licheng², GUO Qian¹, YANG Yuting¹, CHEN Sihui¹

(1.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: MODNDIT/NDVI vegetation remote sensing data, contemporaneous meteorological data, and ESA CCI-LC vegetation cover classification data from 2000 to 2015 were used to investigate the spatial and temporal distribution and dynamic changes of vegetation cover on the Loess Plateau and its response mechanism to climate and human activities. The Loess Plateau's NDVI distribution patterns, change trends, and their driving variables were spatialized and studied based on the contributions of climatic and anthropogenic factors to changes in vegetation cover. The results showed that: (1) the NDVI of the Loess Plateau increased from the northwest to the southeast, with clear spatially uneven distribution characteristics; the NDVI during the past 16 years demonstrated a substantial upward trend, with a mean rate of increase of 0.010 2/a and a variation range of 0.54 to 0.71; (2) with a partial correlation coefficient of 0.53, the NDVI trend of Loess Plateau was highly connected with precipitation; (3) the NDVI of the Loess Plateau increased in all seasons, and the NDVI of spring was strongly and positively linked with precipitation, with precipitation being the greatest direct influence in determining the cover changes of all vegetation species in spring; (4) the residual analysis revealed that human activities had a significant effect on the fluctuation of NDVI in the Loess Plateau, which was a key driver of vegetation cover change in the Loess Plateau. In summary, the Loess Plateau's vegetation cover had increased significantly over the last 16 years, and precipitation is the main limiting factor for the

收稿日期:2022-01-02

修回日期:2022-05-17

资助项目:国家自然科学基金“黄土丘陵沟壑区植被水沙拦截效率变化与水文连通性响应”(4197071873)

第一作者:逯金鑫(1995—),男,内蒙古通辽人,硕士研究生,研究方向为气候变化与生态恢复。E-mail:ljx1230@nwfufu.edu.cn

通信作者:温仲明(1969—),男,陕西定边人,博士,研究员,主要从事黄土高原植被恢复与重建研究。E-mail:zmwen@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

Loess Plateau's vegetation growth and development. Through ecological restoration measures such as 'Grain for Green', human activities have significantly improved the vegetation cover of the Loess Plateau.

Keywords: vegetation dynamics; driving factors; normalized difference vegetation index; the Loess Plateau

全球变化与陆地生态系统(global change and terrestrial ecosystem, GCTE)旨在分析气候变化、人类活动及其他环境变化对陆地生态系统结构和功能的影响^[1]。植被作为陆地生态系统组成的重要主体之一,联结土壤、大气、水文等生态要素,在气候调节、水土保持、稳定生态系统等方面起到重要作用^[2]。因此,深入研究复杂的气候变化背景下植被变化的驱动机制,对于区域生态环境的改善及生态服务功能的提升具有重要意义,已经成为全球变化研究的核心热点之一^[3-4]。

在全球气候变暖的趋势下,气候因子的变化及人类活动的干扰势必会影响生态系统的结构和状态,对植被的生长动态、植被群落结构的组成也具有明显影响,其中最直接的作用是导致陆地生态系统植被覆盖度发生变化。植被覆盖度是能够反映植被分布的密集度以及表征植被生长动态及生态系统质量的主要指标之一,对区域生态环境的好坏有重要指示作用^[5]。传统的植被覆盖度监测方法主要是基于经验而实现的目测法、基于仪器工具实现的量测法,而这些方法往往耗时且成本较大,仅仅适应于小尺度范围下的植被覆盖度评估,且经验评估结果往往存在较大的误差^[6]。近年来,随着遥感技术的不断革新和发展促使广大学者基于遥感手段实现大尺度空间下的植被覆被动态监测^[7]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是检测植被生长状态的重要指标,也是表征植被活动的重要参数,具有分辨率高、监测范围广且时效性强等众多优点,能够清晰准确地反映出植被的真实生长状态及时空动态演变格局^[8-9]。

黄土高原位于黄河中上游,是世界上水土流失最严重的区域之一^[10]。黄土高原东西横贯半湿润、半干旱气候区,南北兼跨暖温带、中温带,气温较差大,降水分配不均,生态环境较为脆弱。20世纪90年代以来,黄土高原开展大规模的退耕还林(还草)工程,黄土高原的植被覆盖得到极大改善。在气候变化的背景下,研究黄土高原地区的植被覆被状况及其潜在的影响因素有助于该地区生态环境的保护与资源合理开发。气候变化和人类活动被认为是植被覆被发生变化的主要影响因素,由于两者的属性并不相同,且具体的气候及人为因素众多,很难基于同一指标来量化两者对植被变化的影响。针对黄土高原植被变化及其归因分析已有相关研究^[11-12],以往研究多是基于气象数据和社会统计数据的时序变化趋势,

从不同阶段来定性探讨气候因素和人类活动对植被变化的影响。采用该方法虽能一定程度上反映植被与气象因子及人类活动的关系,但缺乏植被对气象因子响应的深层分析及人类活动影响植被变化的贡献程度,并且未考虑植被对气象因子的时滞效应。因此精确地评估并区分气候和人类因素对植被动态变化的相对贡献对于植被生态适应性对策的完善及植被资源的优化都具有至关重要的意义。基于此,本文利用 MODND1T/NDVI 植被遥感数据、气象数据和 ESA CCI-LC 植被覆被分类数据分析 2000—2015 年来黄土高原地区植被覆被的时空格局动态特征,系统地研究黄土高原植被变化对于气候因子和人类活动的响应机制,旨在揭示黄土高原植被覆被变化的时空格局及驱动机制,以期为黄土高原生态资源合理开发与管理提供科学的理论依据。

1 研究区概况

黄土高原(100°52'—114°33'E, 33°41'—41°16'N)位于黄河流域中游,东西横跨 1 000 余千米,南北纵贯 750 km,总面积达 640 000 km²(图 1)。黄土高原地区处于干旱向湿润地区的渐变地带,受亚洲季风影响,夏季炎热且降水较少,冬季干燥寒冷,年均气温为 3.6~14.3℃,降水量空间变异大,年均降水量为 100~800 mm,属于半干旱大陆性季风气候,主要的植被类型是农田、灌木、草地、林地、镶嵌类型植被(镶嵌草地、镶嵌林地)等。

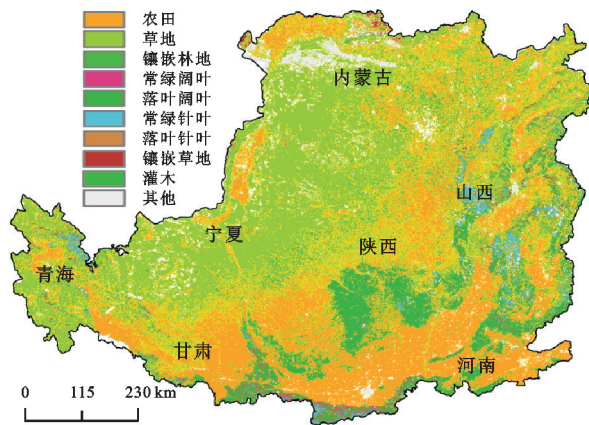


图 1 2000—2015 年黄土高原植被类型分布

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

为研究长时间序列下黄土高原植被的动态格局,

本研究选用美国国家航天局(NASA)地球观测系统(<http://www.nasa.gov/>)提供的 2000—2015 年 MODND1T/NDVI 数据产品,该数据时空分辨率分别为 16 d 和 500 m。该数据精度较高、误差小且质量可靠,为中高纬度地区的植被研究提供高质量的 NDVI 数据,因而在植被动态监测中应用较为普遍。为进一步消除大气、云及太阳高度角对数据的干扰,采用国际惯用的最大合成法 MVC(maximum Value Composites)获取月 NDVI 值^[13]。将月尺度 NDVI 时间序列数据集按 3—5 月、6—8 月、9—11 月、12—2 月进行分类并求平均得到季节尺度及年尺度的 NDVI 时间序列数据集^[14]。

气象数据来源于中国气象数据共享信息服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),在 ArcGIS 中根据黄土高原矢量边界裁剪获得 2000—2015 年黄土高原 82 个气象站点的温度和降水量数据。利用 ArcGIS 软件对气象数据进行普通克里金插值,获取与 NDVI 数据像元大小一致且投影相同的气象栅格影像。

土地覆被类型数据是从由欧空局(European Space Agency,ESA)提供的 Global Land Cover 2000 产品中提取而成,空间分辨率为 300 m。对数据影像进行重采样后获得与气象数据、遥感数据相同分辨率的农田、镶嵌草地(草本分布>50%)、灌木、草地、镶嵌林地(乔木分布>50%)、常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林、城市、裸地、水体 12 类土地利用类型。社会经济数据来源于各省(自治区)统计年鉴。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析 使用一元线性回归法[公式(1)]分析 2000—2015 年黄土高原 NDVI 时空变化趋势。

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

式中: k 为 NDVI 变化趋势斜率; n 为监测时间段的年数($n=16$); i 为监测的时间顺序; NDVI_i 为第 i 年或 i 季度植被覆盖度。采用 F 检验对 NDVI 变化趋势进行显著性检验,根据 F 检验结果将植被变化趋势分为 4 个等级: $k>0, p<0.05$ 表示植被覆盖显著增加; $k>0, p>0.05$ 表示植被覆盖无显著增加; $k<0, p<0.05$ 表示植被覆盖显著减小; $k<0, p>0.05$ 表示植被覆盖无显著减小。

2.2.2 相关性分析 利用偏相关分析分别计算 2000—2015 年黄土高原年均 NDVI 及各季节 NDVI 与不同气候因子的相关性,先计算简单线性关系,再计算偏相关关系,计算公式如下:

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

式中: R_{xy} 为 NDVI 与气候因子的相关程度; x 和 y 为 NDVI 与气候因子; i 为当年或当季; \bar{x} 和 \bar{y} 为所示变量的平均值。

$$R_{ab,c} = \frac{r_{ab} - r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{(1-r_{ac}^2)}\sqrt{(1-r_{bc}^2)}} \quad (3)$$

式中: $R_{ab,c}$ 为控制 c 之后 a 与 b 间的偏相关系数; r_{ab}, r_{ac}, r_{bc} 为不同变量间简单线性相关系数。

采用 t 检验来进行相关性的显著性检验,根据检验结果将相关性划分为显著正、负相关,正相关或负相关。

2.2.3 残差分析 使用残差分析法计算人类活动对黄土高原植被变化的贡献程度^[15]。在像元尺度上建立温度和降水的回归模型获得逐年 NDVI 预测值[公式(4)],从遥感影像提取的 NDVI 实测值减去 NDVI 预测值得出残差[公式(5)],用以表示人类活动对植被覆盖变化的影响。

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

$$\epsilon_{\text{HA}} = \text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{cc}} \quad (5)$$

式中: ϵ_{HA} 为残差;NDVI 为实测值; NDVI_{cc} 为预测值; T 为温度; P 为降水量。

3 结果与分析

3.1 2000—2015 年黄土高原平均 NDVI 空间分布

黄土高原 NDVI 分布具有明显的地带性特征,在空间上呈现出从东南向西北逐渐减少的趋势(图 2)。NDVI 大于 0.6 的区域主要分布在陕西、河南和山西境内的秦岭山地、汾渭盆地和大巴山山地,青海和甘肃的祁连山森林区,表明该区域植被长势较好。NDVI 介于 0.4~0.6 的区域呈条带状分布在黄土高原东北至西南方向,该区域水热条件丰富,植被覆盖茂密,因而 NDVI 相对较高。NDVI 在 0.2~0.4 的区域的主要集中在宁夏、陕西北部以及内蒙古西部,以上地区植被类型多为草地和耕地为主,植被较为稀疏。NDVI 低于 0.2 的区域主要分布在内蒙古的杭锦旗,地表覆盖主要是荒漠裸露地,植被覆盖率低,因此 NDVI 相对较低。

3.2 年均 NDVI 变化及其气候响应

3.2.1 年均 NDVI 变化趋势 2000—2015 年,黄土高原平均 NDVI 整体呈现显著的增长趋势($R^2=0.803$, $p<0.01$),平均增长速率为 0.010 2(图 3)。其中,NDVI 最低值为 2001 年的 0.54,最高值为 2015 年的 0.71。总体来看,2000—2015 年黄土高原的平均 NDVI 呈显著增加趋势。

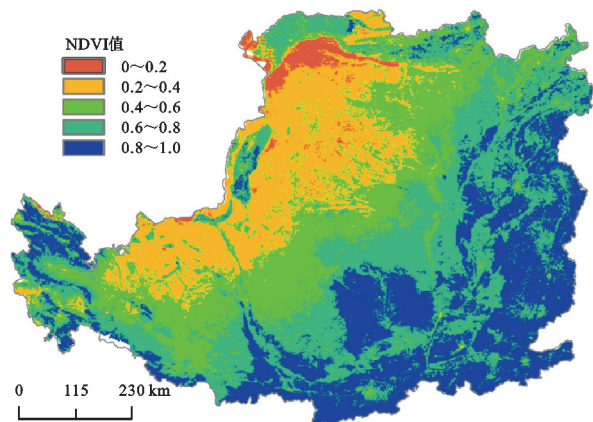


图2 2000—2015年黄土高原平均NDVI空间分布格局

3.2.2 NDVI变化趋势的空间格局及其气候响应

图4展示了2000—2015年黄土高原NDVI空间动态变化特征,16年间黄土高原NDVI呈增加和减小趋势的面积分别占其整体面积的97.02%,2.98%。NDVI在大部

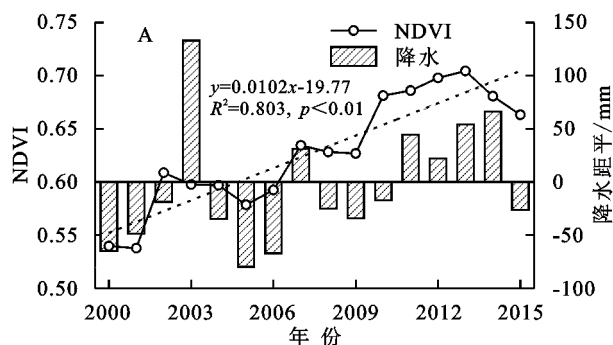


图3 2000—2015年黄土高原NDVI、温度和降水的年际变化趋势

分地区均呈显著增加趋势,其中显著增加($p < 0.05$)的地区为77.54%;而显著减小($p < 0.05$)的区域较小,仅占黄土高原面积的2.55%。

在像元尺度上探究黄土高原NDVI与气温、降水相关性的空间分布规律,对每个像元单位进行计算,结果如图5A所示,降水与黄土高原NDVI主要呈正相关,约占研究区总面积的90%,其中显著正相关面积约为20%。黄土高原NDVI与温度相关性的空间分布比较平均(图5B),NDVI与温度呈正相关的区域约53%(显著正相关5.12%),呈负相关的区域约47%(显著负相关1.04%),二者差异不大。为充分对比不同气候因子与NDVI的区别响应,依次对降水、温度偏相关系数求平方后计算差值。如图5C所示,在西部、中部和西北部分地区降水的正效应大于温度的负效应(64.55%),而其他地区温度的正效应大于降水的负效应(35.45%)。

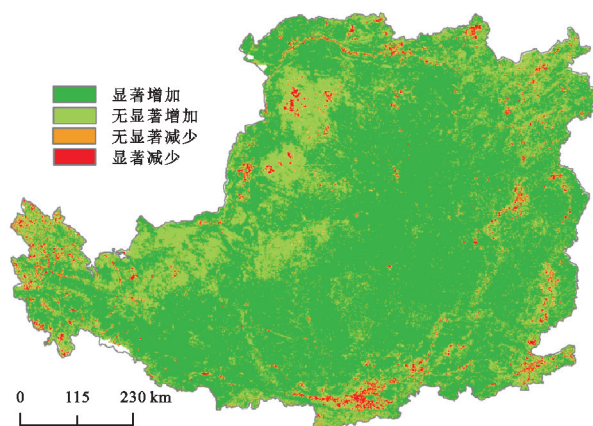
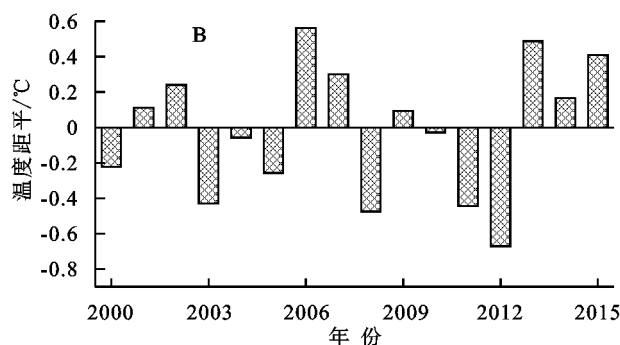


图4 2000—2015黄土高原平均NDVI空间动态

3.3 不同季节NDVI对气候变化的响应

3.3.1 不同季节NDVI变化及其气候响应 2000—2015年黄土高原各季节NDVI均呈增加趋势。其中,春季(图6A)和夏季(图6B)NDVI增长速率相同,每年以0.0078($p < 0.01$)的速率增加,秋季(图6C)和冬季(图6D)NDVI分别以每年0.0096($p < 0.01$)和0.0112($p < 0.01$)的速率增加。由图7可知,春季NDVI与春季降水的响应显著,两者变化趋势相近,偏相关系数为0.72($p < 0.01$)。夏季NDVI与春季降水同样

呈显著的正相关关系($R = 0.59, p < 0.05$)(图7),因为春季降水促进春季植被生长,春季植被的生长对夏季植被生长起延续作用。对春、夏NDVI相关性的统计结果也显示,春季NDVI与夏季NDVI存在显著的正相关($R = 0.81, p < 0.01$)关系。

3.3.2 不同季节NDVI与气候因子响应的空间分布 黄土高原不同季节NDVI对于降水及气温的响应有着很大的差异,黄土高原春季NDVI与降水呈正相关的区域占黄土高原总面积的91.08%,呈负相关的区域占总面积的8.92%,其中显著正相关的区域约39%,主要分布在黄土高原中部地区(图8A)。春季NDVI与温度呈正相关和呈负相关的面积分别为72.10%,27.90%,呈正相关的地区主要分布在黄土高原中部和西部地区,而呈负相关的地区分布在东南地区和东北小部分地区(图8E)。夏季NDVI与降水(图8B)呈正相关的面积占黄土高原整体区域的79.10%,夏季NDVI与温度(图8F)主要呈负相关(56.48%),黄土高原夏季温度较高、蒸发量大,造成地表水分过度流失进而抑制植被生长。秋季NDVI与温度(60.35%)的相关性总体上以正相关为主,主要分布在黄土高原中部和东南部分地区(图8G),

而秋季 NDVI 与降水(81.60%)呈正相关的地区集中在黄土高原西部、中部和北部地区(图 8C)。冬季 NDVI 与温度(图 8H)主要呈正相关(70.82%),仅 29.18%的区域呈负相关,分布在黄土高原中部及西北、西南部分地

区。冬季 NDVI 和降水(图 8D)大部分区域呈负相关(68.60%),分布在黄土高原北部、南部及东南、东北地区,相较于其他季节,黄土高原冬季的植被凋零导致 NDVI 减小,与降水的增加呈负相关关系。

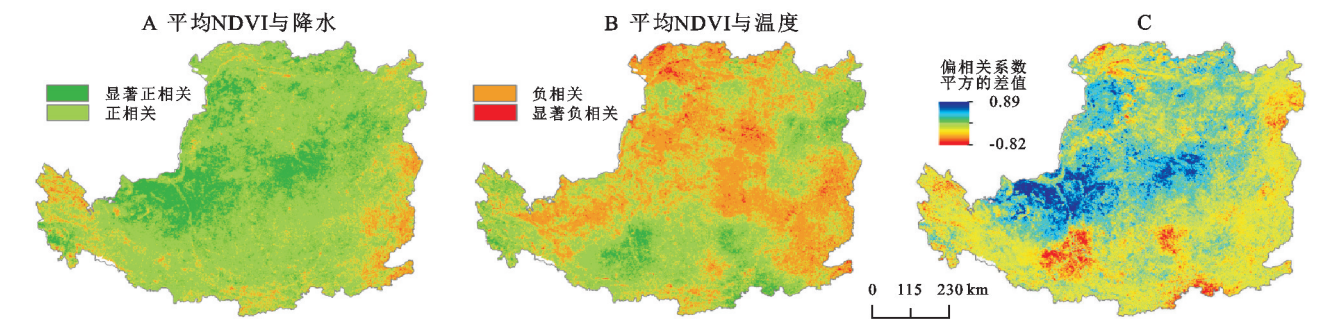


图 5 2000—2015 年黄土高原平均 NDVI 与降水和温度的偏相关性空间分布及其平方差(c)

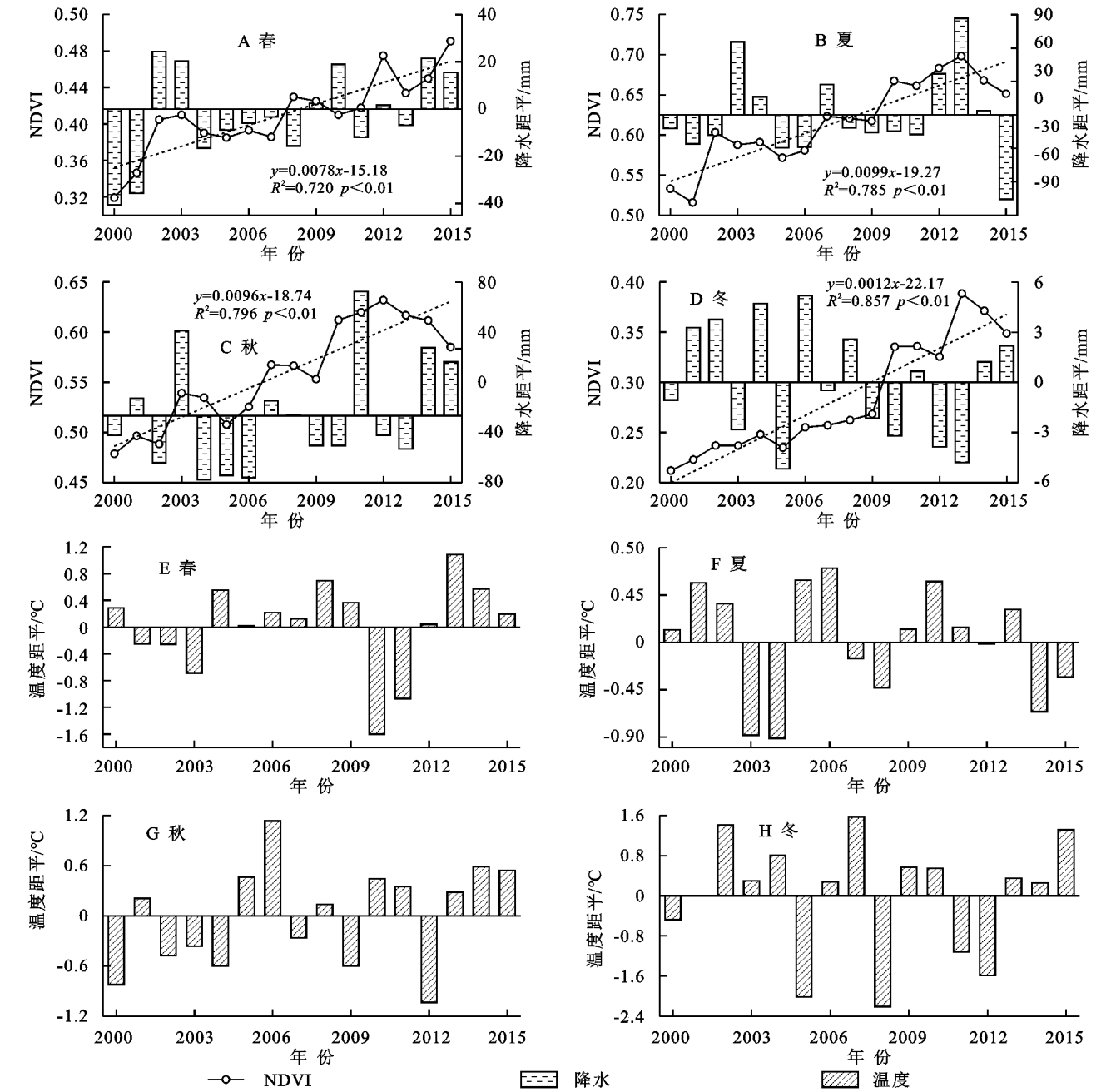
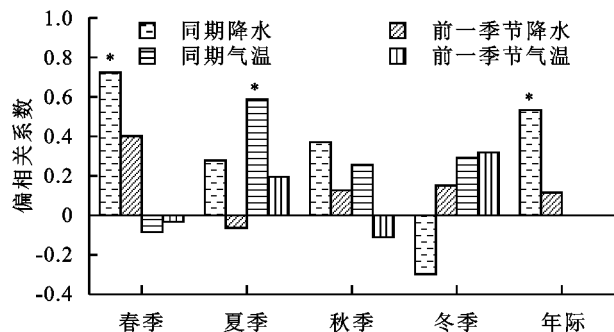


图 6 2000—2015 年黄土高原四季 NDVI、降水及温度的年际变化变化趋势



注: * 代表 $p < 0.05$ 。

图 7 2000—2015 年黄土高原不同季节 NDVI 与温度、降水量的偏相关关系

3.3.3 不同植被类型 NDVI 对气候因子的响应 黄土高原不同植被类型与降水相关分析表明,黄土高原所有植被类型与降水均呈正相关,其中灌木和草地为

显著正相关(图 9A)。如图 9B 所示,黄土高原农田、镶嵌草地、草地、镶嵌林地、常绿阔叶、落叶阔叶、常绿针叶 7 种植被类型 NDVI 与温度呈正相关,灌木和落叶针叶林与温度呈负相关。在季节尺度下,降水是春季植被生长的最主要驱动因子,黄土高原所有植被类型春季 NDVI 均与降水呈显著正相关(灌木和落叶针叶林无显著关系)。夏季气温和降水对夏季所有植被类型 NDVI 的影响均不明显,夏季 NDVI 对春季降水的滞后效应较显著(图 9C)。秋季降水与灌木(0.56)和草地(0.53)呈显著正相关,而秋季温度与灌木(-0.58)和草地(-0.05)呈显著负相关和负相关。冬季所有植被类型 NDVI 与气温和降水的响应均不显著,冬季降水与所有植被类型 NDVI 均呈负相关,而冬季温度与所有植被类型 NDVI 均呈正相关[落叶针叶林(-0.19)除外]。

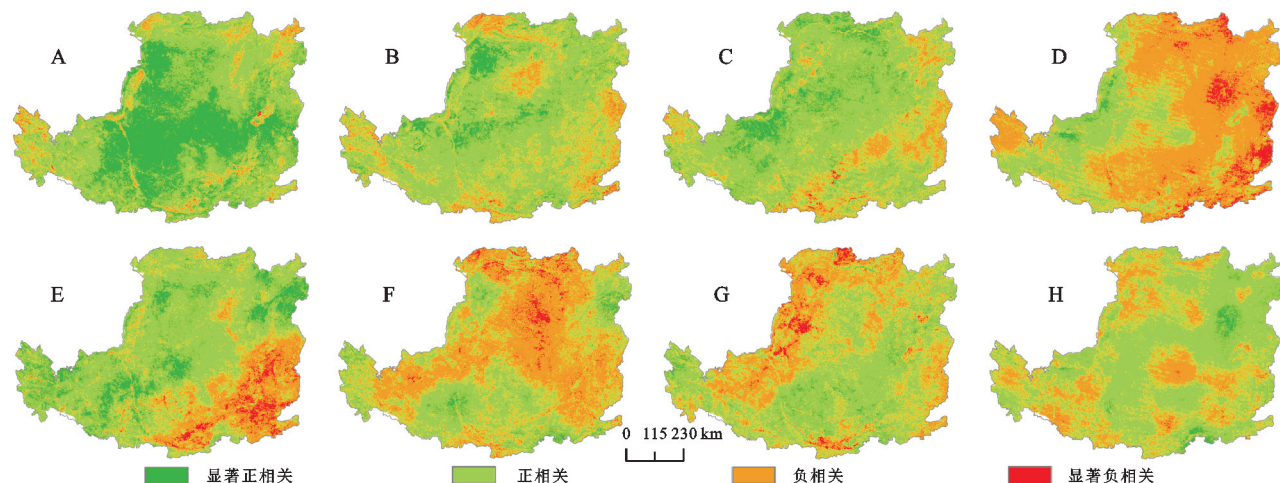


图 8 2000—2015 年黄土高原各季节 NDVI 与降水(A 春、B 夏、C 秋、D 冬)和温度(E 春、F 夏、G 秋、H 冬)偏相关性的空间分布

3.4 人类活动与黄土高原植被变化的响应

气候是植被覆盖发生变化的主要驱动因素,人类通过传统农牧业活动及开采等方式协同驱动植被覆盖发生改变。残差分析表明(图 10A),2000—2015 年黄土高原 NDVI 残差值呈上升趋势的面积为 95.33%,人类活动导致植被覆盖显著增加的区域约占总面积 61.43%,主要分布于黄土高原中部、东部、北部和西南部分地区(图 10B)。在其他研究中也发现相似结果,可能是黄土高原实行退耕还林(草)政策等生态工程的有效实施而得到改善^[16]。而残差值呈下降趋势,人类活动导致植被覆盖减小区域仅占黄土高原总面积的 0.37%,这可能与这些地区资源过度开发利用、城市化推进及与立地条件不适的恢复措施密切相关^[17]。

为定量分析人类活动对黄土高原 NDVI 的影响,选取人口密度、人均 GDP 两种社会经济指标用以表示人为因素。如图 11 所示,从 2000—2015 年,黄土高原的人口密度、人均 GDP 均呈显著上升趋势($p < 0.001$),其中人口密度的变化接近直线,说明黄

土高原的人口仍处于增长阶段,有增长的空间。人均 GDP 呈抛物线上升,从 2014 年开始上升趋势不再明显,表明人均 GDP 受到最大环境容量的限制,变化幅度波动逐渐平稳。为进一步探究人为因素对黄土高原 NDVI 的影响,对黄土高原年均 NDVI 与人口密度、人均 GDP 分别进行相关分析(表 1),结果表明,人均 GDP、人口密度与 NDVI 呈显著正相关关系,相关系数均为 0.92。此外,人均国内生产总值、人口密度存在很强的正相关关系。

4 讨论

IPCC 指出过去的 30 a 是北半球的最热时段,北半球的大部分地区气候都在经历着持续变暖的趋势,全球变暖进一步改变了海陆热力差异,从而引起区域或全球的降雨格局发生改变^[18]。气温及降水是反映气候变化的最直接因子,其时空格局演变对于全球陆地生态系统的生长、分布格局及其功能性状均产生重要影响。黄土高原生态系统处于生态环境脆弱区,因

而对于气候变化的响应非常敏感,在全球变化的背景下,黄土高原区域的气候状况也不断发生变化,表现出较大的区域差异性^[19]。

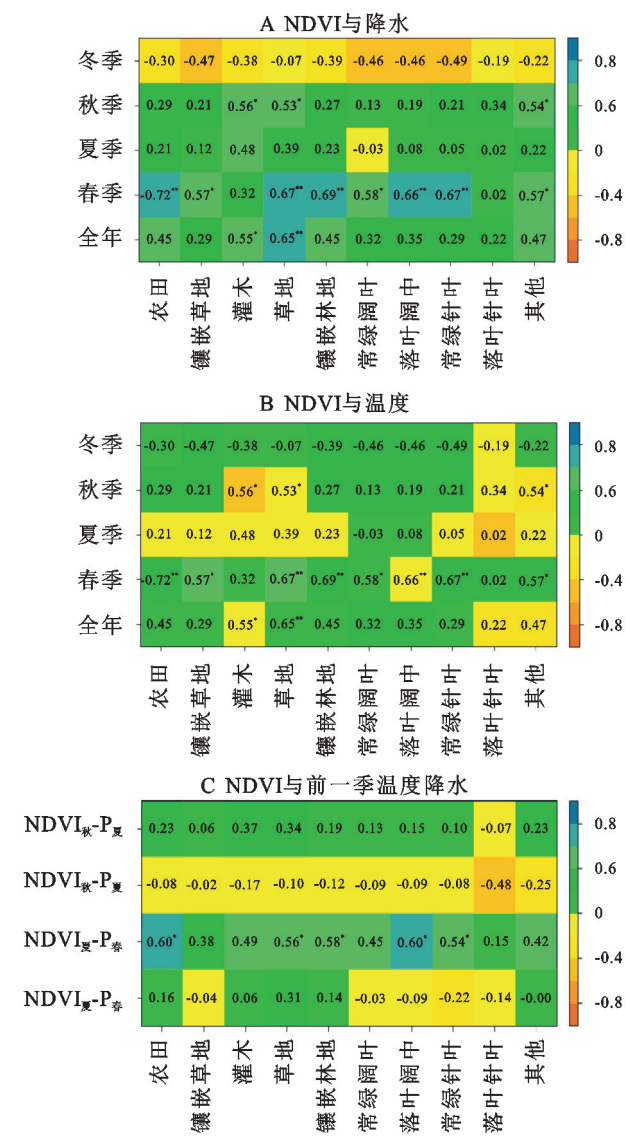


图 9 不同植被类型 NDVI 与降水量和温度及前一季温度降水的偏相关关系

21 世纪以来,国家对黄土高原实施了退耕还林(草)工程等一系列生态环境治理措施,对黄土高原植被覆盖产生了较大变化。本研究基于黄土高原气象栅格数据,植被遥感数据及植被覆被分类数据从年尺度和季节尺度分析 2000—2015 年黄土高原植被的时空演变格局及其影响因素。空间上,黄土高原 NDVI 呈现自东南向西北逐渐减小的分布格局(图 2),造成这种格局主要归因于降水分布不均。同一热量带下,降水量随着海陆距离的增加而不断减少,因而靠近内陆地区的 NDVI 较低。黄土高原 NDVI 的空间分布格局由植被类型、水热组合条件及人类干扰共同影响,进而导致黄土高原 NDVI 存在着较大的空间异

质性^[20]。图 5A 表明黄土高原大部分地区 NDVI 和降水呈正相关,黄土高原大多处于干旱和半干旱地区,降水相对较为匮乏,因此降雨成为制约植被生长的主导因素,而气温的升高则不利于植被的生长。黄土高原 NDVI 和降水呈负相关的区域零星分布在青海及山西等地,该部分区域海拔较高,光照辐射对于植被的生长具有重要意义,而降水量的增加则意味着太阳辐射减弱,从而会对植被的光合作用产生一定限制,降水并不是植被生长的决定性因子,因此降水量的增加对于该部分地区的植被生长产生抑制作用。综上分析,黄土高原 NDVI 的增加与降水量的大幅增加有紧密联系,而气温对于黄土高原 NDVI 的影响较弱。本研究发现黄土高原 NDVI 与气温呈现显著正相关关系的区域主要集中陕西及河南地区(图 5B),该部分地区处于黄土高原腹地,多数处于半干旱和半湿润地区,降水适中,且海拔较高,对于大多数区域而言,光照辐射是植被生长的限制性因子,因此这些地区光照的增强则会导致气温升高,进而促进植物的光合作用增强。时间上,2000—2015 年黄土高原 NDVI 介于 0.54~0.71,且每年以 0.010 2($R^2=0.803$, $p<0.01$)的速率呈显著增加趋势,显著增加区域占黄土高原总面积 97.02%。这与赵安周等^[21]的研究结果相一致,表明退耕还林(草)等生态恢复措施对黄土高原地区植被恢复重建发挥了重要作用。2000 年后国家大力推动一系列的生态恢复政策,例如围栏封育、退耕还林(草)和人工种树(草)等的开展对于黄土高原植被的生长发展具有明显的促进效应,进而引起黄土高原植被覆盖的增加。

另外,过去大量研究显示,不同时空尺度下 NDVI 与气候因子的响应有所差异^[15]。因此,为进一步揭示不同时空尺度下黄土高原 NDVI 对气候因子的响应规律,对不同季节及不同植被类型黄土高原 NDVI 与气温、降水的相关性进行分析。结果表明,春季 NDVI 与春季降水呈显著正相关关系,偏相关系数为 0.72($p<0.01$),且春季所有植被类型 NDVI 与降水均呈显著正相关(除灌木和落叶针叶林植被),说明降水是黄土高原植被被春季生长最主要的驱动因子。黄土高原地处内陆干旱半干旱地区,水分是植被生长的首要限制因素,但不同植被类型对水分的获取能力有所差异。灌木和落叶针叶林植被由于其根系较深,对地下水的汲取强于草本植被,因此对春季降水依赖较小,无明显相关性。夏季气候因子对 NDVI 无显著驱动作用,但夏季 NDVI 对春季降水的滞后效应响应明显(图 9C)。春季植被

生长对下一季植被生长具有明显正“遗产”作用,春季降水促进了当季植被生长,进而延续到下一季植被生

长。秋季和冬季 NDVI 与气象因子的相关性各有其明显空间分布规律。

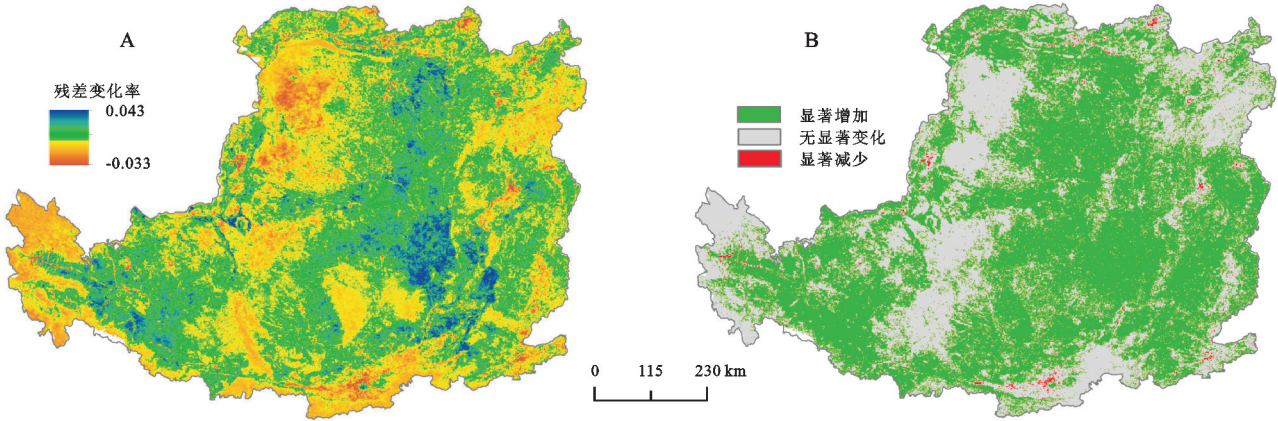


图 10 黄土高原 NDVI 残差空间动态(A)及其显著性(B)的空间分布

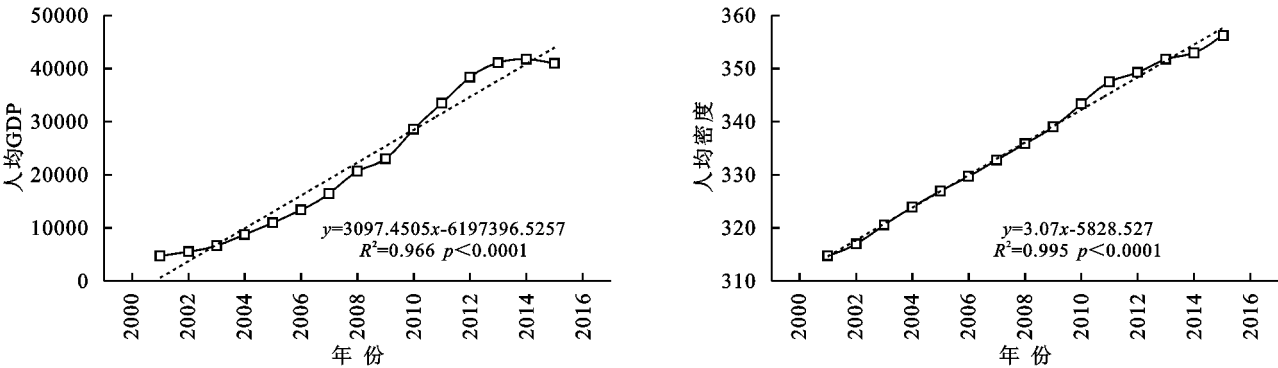


图 11 黄土高原社会经济指标变化趋势

表 1 黄土高原年均 NDVI 与人为因素的相关系数

人为因素	人均 GDP	人口密度	年均 NDVI
人均 GDP	1		
人口密度	0.99***	1	
年均 NDVI	0.92***	0.92***	1

人为干扰是植被变化的主要驱动因素之一。本研究以遥感资料和气象资料为输入参数,使用残差分析法,通过比较潜在 NDVI 和实际 NDVI 来区分气候变化和人类活动对植被动态的相关贡献度,植被动态的人类贡献度可以通过计算潜在 NDVI 和实际 NDVI 的差异来确定,这种方法通常是基于植被生长只受气候和人为因素控制的假设^[22]。该方法假设黄土高原植被变化的影响因素只有气候变化和人类活动,然而植被潜在 NDVI 和植被实际 NDVI 之差也并不能够仅仅表示人类活动对草地 NPP 的影响。由于评估方法的限制,事实上,除了人类活动的其他因素诸如病虫害、森林火灾、自然物种和疾病暴发等并不能够被定量评估^[23]。当然这些因素也可能与气候变化或某方面的人类活动有重大关系,因此如何将这些具体因素对植被 NDVI 变化的影响区分开来将成为未来研究的一个挑战^[24-25]。另一方面,植被潜在 NDVI 表示植被生

长在仅仅受气温和降水控制下所能达到的最大覆盖程度,事实上这种理想的植被生长状态可能并不存在,比如前文所说的这些具体因素同样会影响植被的生长,因此这些因素也将对评估造成一定的不确定性。然而,本研究从大的时空尺度上揭示气候和人类活动对黄土高原植被动态变化的相对贡献度,对于后续的植被变化影响因素的深入研究提供重要依据。

5 结论

本研究基于 2000—2015 年的 MODNDIT/NDVI 植被指数数据、同期气温和降水量数据及 ESA CCI-LC 植被覆被分类数据,分析了黄土高原植被覆盖的时空变化特征以及气候因素和人为因素的驱动机制。空间尺度分析表明,2000—2015 年黄土高原 NDVI 自西北向东南逐渐增加,呈现出明显地带差异。呈增加和减小趋势的面积分别占其整体面积的 97.02%,2.98%;显著增加($p<0.05$)的区域为 77.54%,而显著减小($p<0.05$)的地区为 2.55%。过去 16 a,黄土高原 NDVI 介于 0.54~0.71,以每年 0.010 2($R^2=0.803, p<0.01$)速率呈显著增加趋势,总体呈显著增加趋势。黄土高原 89.27% 地区的 NDVI 与降水呈正相关(显著正相关 20.52%),两

者偏相关系数为 0.53($p < 0.05$), 与气温的偏相关系数为 0.11。不同季节 NDVI 均呈增加趋势, 黄土高原春季 NDVI 与降水呈正相关的区域超过研究区总面积的 90%, 是影响春季植被生长的关键驱动因素, 对夏季 NDVI 的影响具有显著滞后性。秋季和冬季 NDVI 与温度、降水具有明显空间分布规律。人类活动是黄土高原 NDVI 发生变化的重要因素, 人为干扰导致植被覆盖显著减少区域仅为 0.37%。

参考文献:

- [1] 田汉勤, 刘明亮, 张弛, 等. 全球变化与陆地系统综合集成模拟: 新一代陆地生态系统动态模型(DLEM)[J]. 地理学报, 2010, 65(9): 1027-1047.
- [2] Wang X, Piao S, Ciais P, et al. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(4): 1240-1245.
- [3] Roerink G J, Menenti M, Su Z W, et al. Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2002, 28(1/3): 103-109.
- [4] Xie B, Jia X, Qin Z, et al. Vegetation dynamics and climate change on the Loess Plateau, China: 1982—2011 [J]. Regional Environmental Change, 2015, 16(6): 1-12.
- [5] 韦振锋, 王德光, 张翀, 等. 1999—2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1665-1670.
- [6] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003.
- [7] Guillevic P, Koster R D, Suarez M J, et al. Influence of the interannual variability of vegetation on the surface energy balance: A global sensitivity study[J]. Journal of Hydrometeorology, 2002, 3(6): 617-629.
- [8] Groten S M E. NDVI-crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(8): 1495-1515.
- [9] Neigh C, Tucker C J, Townshend J. North American vegetation dynamics observed with multi-resolution satellite data[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1749-1772.
- [10] Mu X, Zhang L, Mcvcar T R, et al. Analysis of the impact of conservation measures on stream flow regime in catchments of the Loess Plateau, China[J]. Hydrological Processes, 2010, 21(16): 2124-2134.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Piao S, Mohammat A, Fang J, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China [J]. Global Environmental Change, 2006, 16(4): 340-348.
- [15] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 576-592.
- [16] 刘洋洋, 王倩, 杨悦, 等. 黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2309-2319.
- [17] 许炯心. 黄土高原生态环境建设的若干问题与研究需求[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 10-13, 79.
- [18] 匡舒雅, 周泽宇, 梁媚聪, 等. IPCC 第六次评估报告第二工作组报告解读[J]. 环境保护, 2022, 50(9): 71-75.
- [19] 郭敏杰, 张亭亭, 张建军, 等. 1982—2006 年黄土高原地区植被覆盖度对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 35-40, 48.
- [20] 阚雨晨, 武瑞鑫, 钟梦莹, 等. 干扰对典型草原生态系统土壤净呼吸特征的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(18): 6041-6050.
- [21] 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.
- [22] 苗旭, 李九一, 宋小燕, 等. 2000—2020 年鄂尔多斯市植被 NDVI 变化格局及归因分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 300-307.
- [23] Gang C, Zhou W, Chen Y, et al. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(11): 4273-4282.
- [24] Mu S J, Chen Y Z, Li J L, et al. Grassland dynamics in response to climate change and human activities in Inner Mongolia, China between 1985 and 2009 [J]. Rangeland Journal, 2013, 35(3): 315-329.
- [25] Xu H, Wang X, Zhang X. Alpine grasslands response to climatic factors and anthropogenic activities on the Tibetan Plateau from 2000 to 2012 [J]. Ecological Engineering, 2016, 92: 251-259.