

2000—2018 年子午岭区植被覆盖时空变化及其与气候变化和人类活动的关系

靳甜甜, 曹二佳, 巩杰

(兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 探究子午岭区气候变化和人类活动与植被动态变化关系, 为子午岭区生态保护、植被恢复监测与评价、生态保护及人类活动管理提供科学依据。[方法] 基于 MODIS EVI 数据和气象数据等, 利用像元二分法、相关分析、残差分析等探究了子午岭区 2000—2018 年生长季(4—10 月) 植被覆盖时空变化及其与气候变化和人类活动的关系, 并定量分析了两者的贡献率。[结果] 2000—2018 年子午岭区生长季植被覆盖指数(EVI) 均值范围为 0.003~0.549, 19 a 来研究区 EVI 变化速率为(-0.19~0.25)/10 a, 且以 0.055/10 a 的增速增加; 子午岭区植被覆盖度约为 46%, 植被覆盖以极显著改善为主。子午岭区植被覆盖的变化主要是因为人类活动和气候变化共同影响。2000—2018 年子午岭区生长季均温和降水对 EVI 变化的影响不显著, 人类活动对子午岭区 EVI 变化产生了正向影响。整体上气候变化对植被覆盖变化的贡献度为 28.19%, 人类活动贡献度为 71.81%。[结论] 子午岭区植被恢复建设的生态效益逐渐增强, 植被覆盖变化主要受人类活动的影响, 气候变化的贡献相对较小。

关键词: 黄土高原; 植被覆盖; 时空变化; 气候变化; 人类活动; 子午岭区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0335-09

中图分类号: P463.22, Q948.12⁺3

文献参数: 靳甜甜, 曹二佳, 巩杰. 2000—2018 年子午岭区植被覆盖时空变化及其与气候变化和人类活动的关系[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 335-343. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.044; Jin Tiantian, Cao Erjia, Gong Jie. Spatiotemporal variations of vegetation coverage and its relationships with climate change and human activities in Ziwouling Region during 2000—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 335-343.

Spatiotemporal Variations of Vegetation Coverage and Its Relationships with Climate Change and Human Activities in Ziwouling Region During 2000—2018

Jin Tiantian, Cao Erjia, Gong Jie

(College of Earth and Environmental Sciences/Key Laboratory of Western China's

Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] The relationships between climate change, human activities and vegetation dynamics change were explored in order to provide a scientific basis for ecological protection, vegetation restoration monitoring and evaluation, ecological protection, and human activity management in Ziwouling Region. [Methods] Based on MODIS EVI data and meteorological data, spatiotemporal variation of EVI and its relationship with climate change and human activities in Ziwouling Region during the growing season (April to October) from 2000 to 2018 were analyzed by using the methods of a dimidiate pixel, correlation analysis, residual analysis, and other methods. The contributions of climate change and human activities to variations in vegetation coverage were quantitatively analyzed. [Results] The average vegetation cover index (EVI) in Ziwouling Region during the growing season from 2000 to 2018 ranged from 0.003 to 0.549 with a growth rate

收稿日期: 2021-07-17

修回日期: 2021-10-19

资助项目: 国家自然科学基金重大项目“中国北方干旱半干旱区气候变化及敏感生态系统的响应与适应”(4179420015)。

第一作者: 靳甜甜(1998—), 女(汉族), 山西省临汾市人, 硕士研究生, 研究方向为 GIS 应用和景观生态学。Email: ttjin20@lzu.edu.cn。

通信作者: 巩杰(1975—), 男(汉族), 甘肃省宁县人, 博士, 教授, 主要从事景观生态学、土地变化科学、环境遥感与生态评价及生态系统服务研究。Email: jgong@lzu.edu.cn。

of 0.055/10 yr. The change rate of EVI in the study area was -0.19 to $0.25/10$ yr in the past 19 years with an increase rate of $0.055/10$ yr. The vegetation coverage in Ziwuling Region was about 46%, and the total vegetation coverage significantly increased over time. The change in vegetation cover was mainly due to the joint influence of human activities and climate change. The average annual temperature and precipitation had no significant correlation with the average EVI change during 2000—2018, while human activities had a positive influence on the average EVI change in the surrounding area of Ziwuling Region. On the whole, the contribution of climate change to vegetation cover change was 28.19%, and human activities was 71.81%. [Conclusion] There has been an increasing trend of ecological benefits arising from vegetation construction in Ziwuling Region. The change of vegetation cover has been mainly affected by human activities and climate change, with the contribution of human activities being higher.

Keywords: Loess Plateau; vegetation coverage; spatiotemporal variation; climate change; human activities; Ziwuling Region

植被动态变化是研究气候变化对陆地生态系统影响的一个重要指标^[1],被称为区域生态环境状况的“指示器”^[2]。植被指数变化可反映植被的生长态势,常用的植被指数有归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和植被增强型指数(enhanced vegetation index, EVI)等^[3]。

由于高植被覆盖区域 NDVI 容易饱和, EVI 应运而生, EVI 可以表征地表植被覆盖和生长状况,有助于揭示高植被覆盖度区域植被动态研究,且在低植被覆盖区具有更强的辨别力^[4]。陈燕丽等^[5]通过对比喀斯特地区植被 MODIS NDVI 数据和 MODIS EVI 数据对气候因子的响应后发现, EVI 与气候因子(除日照外)的相关性更显著。程乾等^[6]研究表明 EVI 相较于 NDVI 更不容易饱和。杨嘉等^[7]通过对西北地区 MODIS NDVI 和 MODIS EVI 比较发现 EVI 具有更好的抗大气气溶胶的作用。此外,已有不少学者利用 EVI 数据分析了区域植被变化及其气候响应。如 Patasaraiya 等^[8]基于 NDVI 和 EVI 数据分析了印度中部森林地区 2000—2015 年植被动态变化及其与气候因子的相关性。Sedighifar 等^[9]使用 EVI 数据探究了伊朗北部 2000—2016 年植被变化并将其对地表温度和降雨的响应进行了时空模拟。李美丽等^[4]、张艳可等^[10]、田志秀等^[11]使用 EVI 数据分别探究了中国西南地区、北回归线云南段、锡林郭勒盟地区植被变化及其对气候的响应,上述研究有助于认知不同区域植被覆盖变化及其影响要素,并进行适应性管理。

黄土高原水土流失严重,是中国生态环境最为脆弱的地区之一^[12-13],1999 年以来的退耕还林还草等生态工程建设对该区域生态环境改善成效显著^[14-15]。关于黄土高原植被变化及其对气候响应的研究已有很多,孙悦等^[16]发现 15 a 黄土高原近 NDVI 总体呈

现上升趋势,对气温、降水的响应有明显的季节差异。董懿等^[17]发现人类活动是黄土高原生态环境变化的主要驱动因素。刘静等^[18]、孟晗等^[19]、郭力宇等^[20]先后分析了黄土高原植被覆盖变化及其对气候因子的响应关系。

但上述研究多侧重年际、季节尺度上降水或气温对植被生长的影响,涉及典型森林区域的研究报道很少。同时,上述研究多为定性的讨论人类活动对植被覆盖的影响,缺少对其的定量描述。子午岭区(包括子午岭国家级自然保护区及周边区域)是黄土高原唯一保存良好的天然次生林区,在水源涵养、气候调节、生物多样性维持等方面发挥着重要作用^[21]。探究子午岭区植被覆盖动态变化可以为该地区的植被监测和生态建设成效评价提供科学依据。因此,本文以 MODIS EVI 为数据源,研究 2000—2018 年子午岭区 EVI 时空变化及其对气候变化的响应、人类活动对该区域产生的影响,同时定量分析两者对研究区植被 EVI 变化的贡献度,以期为该地区植被变化研究与生态环境评估提供科学依据。

1 研究区概况

本文将子午岭国家级自然保护区及其周边区域统称为子午岭区。该区是黄土高原目前唯一保存完整的天然次生林区。子午岭区($34^{\circ}40'—37^{\circ}25'N$, $107^{\circ}30'—110^{\circ}20'E$)地处黄土高原腹地,横跨陕西、甘肃两省,行政单元包括甘肃省华池、合水、宁县、正宁、以及陕西省吴起、志丹、安塞、宝塔、甘泉、富县、黄陵、宜君、王益、印台、耀州、旬邑等 16 个县区(图 1)。子午岭区地处东亚季风气候区,为典型的大陆性气候,研究区海拔约 553~1 817 m。依据黄土高原分区,子午岭区陕西片属黄土丘陵沟壑区,甘肃片为黄土高原沟壑区^[22]。该区地形支离破碎、沟壑纵横,加之降

水集中在 7—9 月,极易发生水土流失和土壤侵蚀。子午岭区地带性植被南部以温带落叶阔叶林为主,北部以温带草原为主。子午岭区以人工林和次生天然林为主,天然林已消失殆尽,植被类型单一,树种结构简单,人工树种主要有油松、樟子松、刺槐、侧柏等。本研究用县(区)行政范围矢量边界分别来源于甘肃省自然资源厅(<http://zrzy.gansu.gov.cn/>)〔审图号:甘 S(2011)22 号〕和陕西省测绘地理信息局(<http://snsm.mnr.gov.cn/Home/IndexNew>)〔陕 S(2018)006 号〕,底图无修改。子午岭区人类活动历史悠久,自明清以来,区域植被经历了破坏、恢复、破坏、恢复的演替过程。区域自然资源(如煤炭、石油等)和文化旅游资源丰富,开采和开发力度大,在促进经济发展的同时,也增加了自然扰动和环境承载压力。

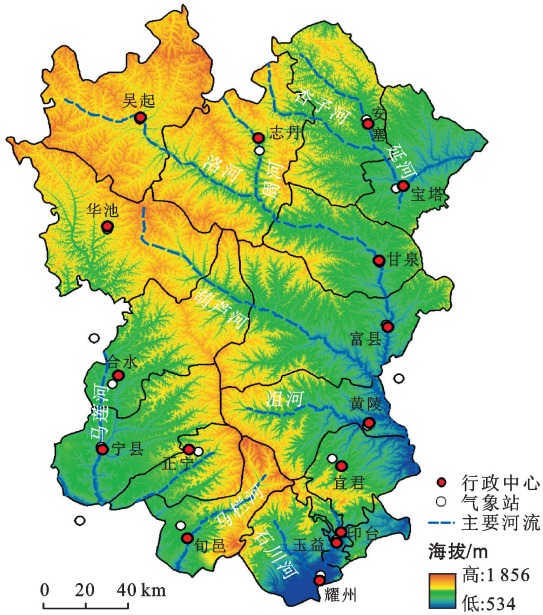


图 1 子午岭区地形图

2 研究数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 遥感数据 所用 MODIS EVI 数据序列(空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d)来源于美国国家航空航天局(<https://MODIS.gsfc.nasa.gov/>)。将 2000—2018 年 EVI 数据集通过 MRT 进行格式、投影转换(投影转换为 Albers),并进一步消除云、大气等噪声,采用最大值合成法生成月 EVI 数据序列。参考徐佳等^[23]研究,非生长季植被生长较差,植被指数易受土壤、积雪反射等影响,因此,以该区域植被生长季 4—10 月为研究时段^[23],裁剪得到子午岭区 2000—2018 年生长季 EVI 数据。

2.1.2 气象数据 气象数据包括研究区及周边 19 个站点 2000—2018 年逐日降水量(P)、最高气温(T_{\max})、平均温(T_{mean})、最低气温(T_{\min})、平均相对湿度(RH)、平均风速(U)、日照时数(N)气象资料以及经纬度、海拔等信息,来源于中国气象数据网和中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。各年气温数据为 4—10 月降水数据(逐日降水量累加)、气温均值通过克里金插值得到的。

2.2 研究方法

2.2.1 像元二分法 本文采用像元二分法估算研究区植被覆盖度,该模型假设每个像元的 EVI 值都是由裸土和植被两部分混合构成。根据研究区 EVI 累计频率表,以累计频率 99.5% 和 0.5% 的 EVI 值作为 EVI_{veg} 与 EVI_{soil} ,计算该地区多年平均植被覆盖度(FVC),其计算公式^[24-25]:

$$FVC = \frac{EVI - EVI_{\text{soil}}}{EVI_{\text{veg}} - EVI_{\text{soil}}} \quad (1)$$

式中:FVC 为植被覆盖度;EVI 为 2000—2018 年生长季平均值。

2.2.2 一元线性回归 本文采用一元线性回归方法在像元尺度上分析研究区 EVI 变化趋势。线性回归方程的斜率用来表示研究区 EVI 的变化速率,定义为 θ ^[1],其计算公式为:

$$\theta = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \bar{x}_i - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n \bar{x}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: θ 为 EVI 变化速率; n 为研究时间序列的长度,值为 19; i 为年序号,取值 1—19; \bar{x}_i 为第 i 年 EVI 的平均值;当 $\theta > 0$ 时,说明 EVI 呈上升趋势;当 $\theta < 0$ 时,说明 EVI 呈下降趋势; θ 的绝对值越大,说明 EVI 的变化速率越快。

2.2.3 相关分析 本文采用相关分析法,计算子午岭区 EVI 与气候因子(气温、降水)的相关系数,用以反映 EVI 与气候因子之间相关性的程度和方向,其取值范围为 $[-1, 1]$ 。相关系数绝对值越大,表明相关性越大。相关系数取值为负表示负相关,取值为正表示正相关。

2.2.4 残差分析 植被覆盖除受自然因素的影响外,人类活动对其的影响也不可忽视,植被覆盖的变化也反映着人类活动的痕迹^[26]。本文采用残差分析法,基于回归分析逐像元建立 EVI 与平均气温和累积降水的关系,得到每个像元上的 EVI 预测值(EVI_p), EVI_p 与遥感观测的实际值作差,用来表示人类活动对植被生长的影响。

气候变化及人类活动贡献度计算方法见表 1^[27]。

表 1 2000—2018 年子午岭区气候变化及人类活动贡献度计算方法

| 变化趋势 | $\theta(\text{EVI}_p)$ | $\theta(\epsilon)$ | 气候变化 贡献度/% | 人类活动 贡献度/% | 变化原因 |
|--------------------------|------------------------|--------------------|--|--|-------------------------|
| $\theta(\text{EVI}) > 0$ | > 0 | > 0 | $\frac{\theta(\text{EVI}_p)}{\theta(\text{EVI})} \times 100$ | $\frac{\theta\epsilon}{\theta(\text{EVI})} \times 100$ | 气候变化和人类活动各自导致植被覆盖增加的贡献度 |
| | > 0 | < 0 | 100 | 0 | 气候变化导致植被覆盖增加 |
| | < 0 | > 0 | 0 | 100 | 人类活动导致植被覆盖增加 |
| $\theta(\text{EVI}) < 0$ | < 0 | < 0 | $\frac{\theta(\text{EVI}_p)}{\theta(\text{EVI})} \times 100$ | $\frac{\theta\epsilon}{\theta(\text{EVI})} \times 100$ | 气候变化和人类活动各自导致植被覆盖减少的贡献度 |
| | < 0 | > 0 | 100 | 0 | 气候变化导致植被覆盖减少 |
| | > 0 | < 0 | 0 | 100 | 人类活动导致植被覆盖减少 |

注： $\theta(\text{EVI})$ 表示真实 EVI 变化趋势； $\theta(\text{EVI}_p)$ 表示模拟 EVI 变化趋势； $\theta(\epsilon)$ 表示残差值变化趋势。

3 结果与分析

3.1 植被生长季 EVI 空间分布特征

研究区 2000—2018 年生长季(4—10 月)EVI 均值呈现明显的空间分布,EVI 均值为 0.325,变化范围为 0.003~0.549(图 2a)。子午岭区不同县区生长季 EVI 均值分析结果显示:黄陵最大(0.426),其次为旬邑(0.401)、富县(0.398)、宜君(0.40),EVI 均值处于 0.30~0.40 主要有耀州、印台、正宁、甘泉、合水、宁县、王益等,EVI 均值小于 0.3 的县区有宝塔、志丹、华池、安塞、吴起等(图 2a)。

基于像元二分法得到研究区的植被覆盖度图

(图 2b),研究区植被覆盖度均值约为 46%,植被覆盖度由高到低为:黄陵(77%)、旬邑(70%)、富县(69%)、宜君(68%)、耀州(62%)、正宁(61%)、印台(59%)、甘泉(57%)、合水(55%)、宁县(46%),植被覆盖度低于研究区均值的县区有华池、吴起、志丹、安塞、宝塔及王益等。为进一步对比分析子午岭核心区及其周边区域多年植被变化差异,本文将植被覆盖度大于 70%的连片区域划分为核心区(主要分布在国家级自然保护区,占研究区面积 25%),其余部分称为周边区域(图 2b)。分析可见子午岭核心区植被覆盖度与周边区域植被覆盖度差异显著(图 2b)。

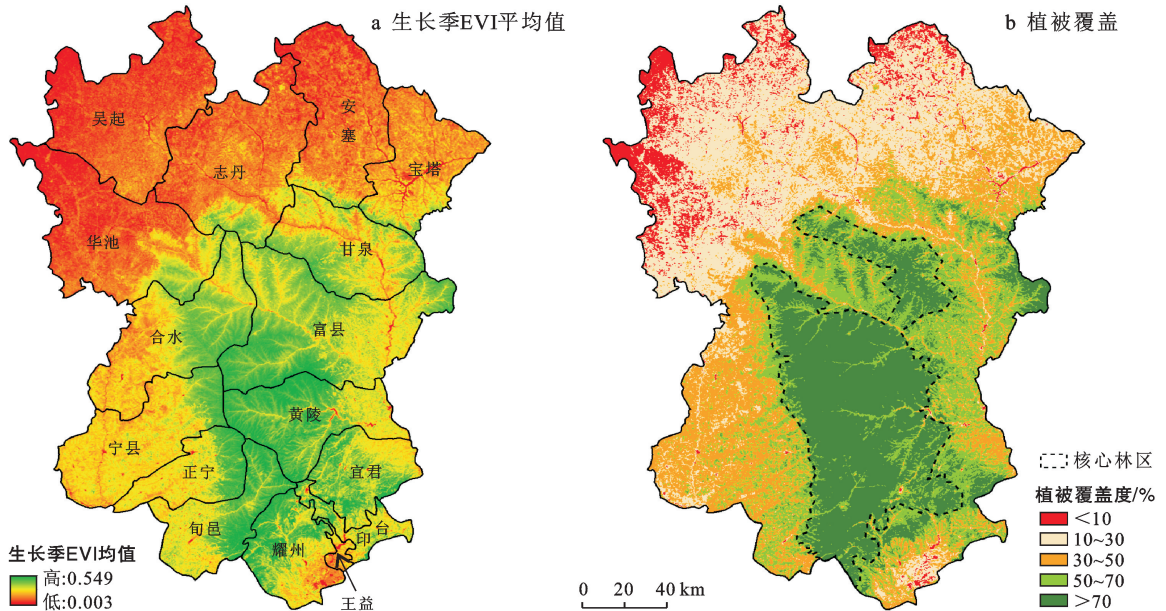


图 2 子午岭区生长季植被增强型指数 EVI 多年平均值及其植被覆盖度分布

3.2 植被生长季 EVI 动态变化特征

3.2.1 时间变化趋势 从 2000—2018 年子午岭区 EVI 均值变化趋势(图 3)可知,19 a 来该研究区植被覆盖整体改善明显,整体 EVI 整体以 0.055/10 a 的

增速增加,最大值出现在 2018 年(0.375),最小值出现在 2000 年(0.252);其中子午岭核心区 EVI 以 0.038/10 a 的增速变化($R^2=0.6798$),周边区域 EVI 增长趋势明显大于核心区域(增速为 0.061/10 a,

$R^2=0.8997$),其变化趋势与研究区基本一致,但周边区域对研究区整体植被改善的贡献大于子午岭区核心林区(图 3)。

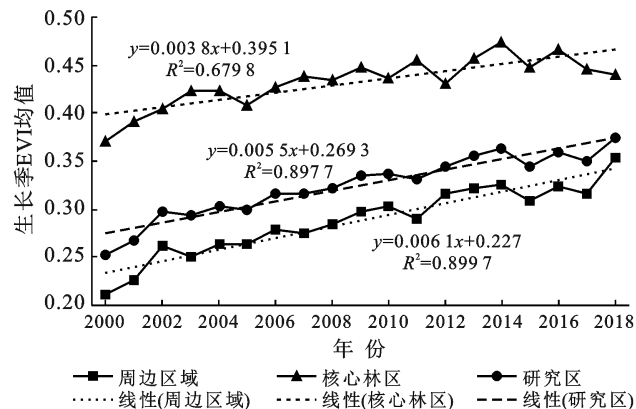


图 3 2000—2018 年子午岭区生长季植被增强型指数 EVI 均值变化

3.2.2 空间变化趋势 采用一元线性模型在像元尺度上分析 2000—2018 年研究区 EVI 变化趋势(图 4a),变化速率处于(-0.19~0.25)/10 a 之间,采用 ArcGIS 中自然断点法将研究区 EVI 变化速率分为 5 个等级:

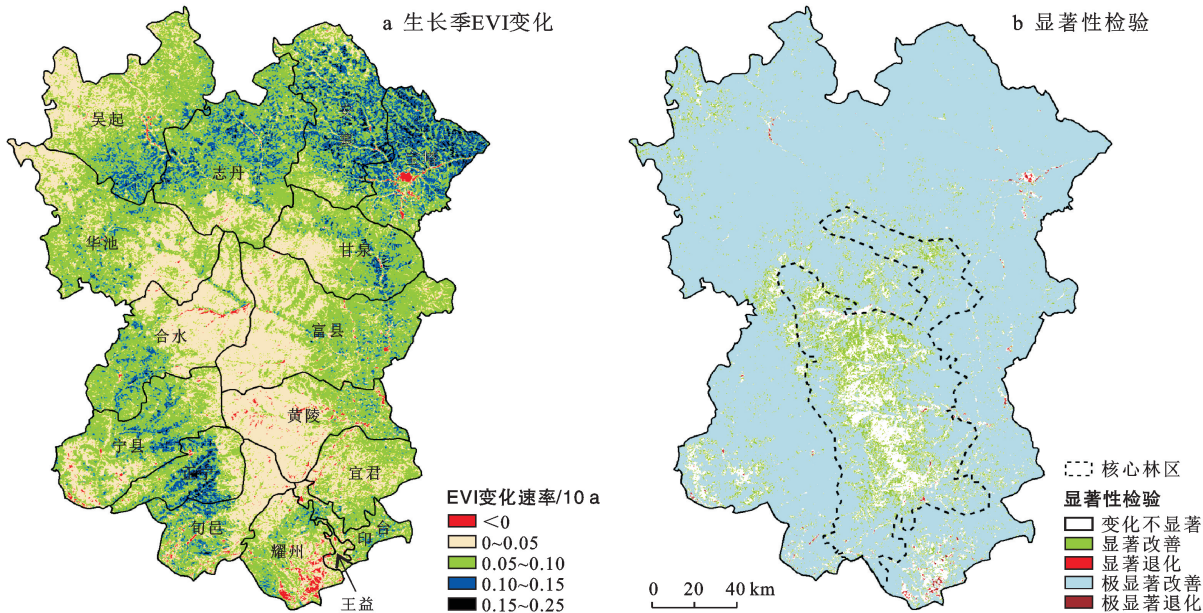


图 4 2000—2018 年子午岭区生长季植被增强型指数 EVI 空间变化及其显著性特征

对核心林区和周边区域 EVI 变化的显著性分析发现:核心林区极显著改善占核心区面积的 63.95%,而在周边区域极显著改善占周边区域面积的 91.78%(表 2)。可见,子午岭周边区域植被改善程度大于核心林区。而在核心林区内,EVI 变化不显著区域占其面积的 19.67%,周边区域 EVI 变化不显著区域仅占其面积的 4.38%(表 2)。

$\theta \leq 0, 0 < \theta \leq 0.05, 0.05 < \theta \leq 0.10, 0.10 < \theta \leq 0.15, 0.15 < \theta \leq 0.25/10 a$ 。由图 4a 可见,EVI 变化速率小于 0 的区域面积较少(面积比例为 0.99%,下同),集中分布在宝塔、耀州等县城周边;变化速率在(0.10~0.15)/10 a 和大于 0.15/10 a 的区域分别占 12.49%,2.12%,主要分布为宝塔、安塞、志丹北部、吴起南部、正宁中部等;EVI 的变化速率在(0~0.05)/10 a 区域所占比例较大(33.02%),主要分布在研究区中部(即核心林区),变化速率在(0.05~0.10)/10 a 区域所占比例最大(51.38%),主要分布在子午岭周边区域(图 4a)。

对 EVI 变化速率采用 F 检验进行显著性检验(图 4b),并将其分为 5 类:变化不显著($p > 0.05$)、显著改善($\theta > 0, p < 0.05$)、极显著改善($\theta > 0, p < 0.01$)、显著退化($\theta < 0, p < 0.05$)、极显著退化($\theta < 0, p < 0.01$)。由图 4b 可见,研究区植被变化整体以极显著改善为主(占 84.77%),其次是变化不显著区域(占 8.23%),主要分布于核心林区的中部;显著改善区域主要分布在不显著变化区域的外围(6.78%),显著退化和极显著退化所占比例很小(0.10%,0.12%),其分布特征与变化速率小于 0 的区域相似,散布在各个县区主要城镇周边。

表 2 2000—2018 子午岭区生长季植被增强型指数 EVI 变化显著性分布面积比例 %

| 区域 | 变化不显著 | 显著改善 | 显著退化 | 极显著改善 | 极显著退化 |
|------|-------|-------|------|-------|-------|
| 核心林区 | 19.67 | 16.19 | 0.11 | 63.95 | 0.08 |
| 周边区域 | 4.38 | 3.61 | 0.10 | 91.78 | 0.13 |

3.3 植被生长季 EVI 变化与气候因子的关系

3.3.1 植被生长季 EVI 变化与气温均值的关系 基于相关分析法开展子午岭区 2000—2018 年逐年生长季 EVI 数据和气温均值的相关性分析, 获得其相关性变化范围为 $-0.84 \sim 0.82$ (图 5a) 和显著性 t 检验 (图 5b)。可见, 子午岭区生长季 EVI 与气温均值主要以不显著相关为主 (88.10%)。显著负相关的区域 (9.41%) 主要为子午岭区东北部, 如宝塔、安塞、甘泉

以及耀州、华池和富县等; 显著正相关区域主要为 (2.49%) 子午岭区东南部县区, 如宜君、印台以及宁县、正宁等; 不显著负相关的区域 (59.29%) 主要为子午岭区中北部, 如吴起、志丹、华池、合水、富县等; 不显著正相关的区域 (28.81%) 主要为子午岭区南部, 如宁县、正宁、旬邑、黄陵、耀州、王益。子午岭核心林区生长季 EVI 与均温主要以不显著相关为主, 说明气温变化对核心林区 EVI 的影响不显著。

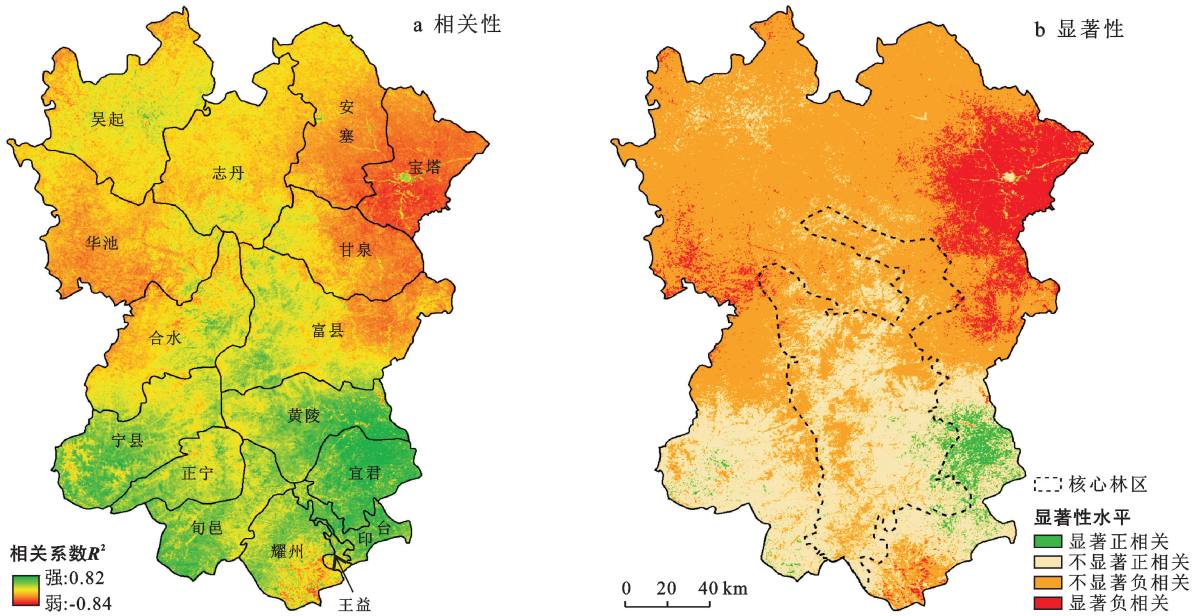


图 5 2000—2018 年子午岭区生长季增强型植被指数 EVI 与气温均值的相关系数及显著性检验

3.3.2 植被生长季 EVI 变化与降水的关系 基于相关分析法开展 2000—2018 年子午岭区逐年生长季 EVI

数据和降水的相关性分析, 获得其相关性变化范围为 $-0.84 \sim 0.93$ (图 6a) 和显著性 t 检验结果 (图 6b)。

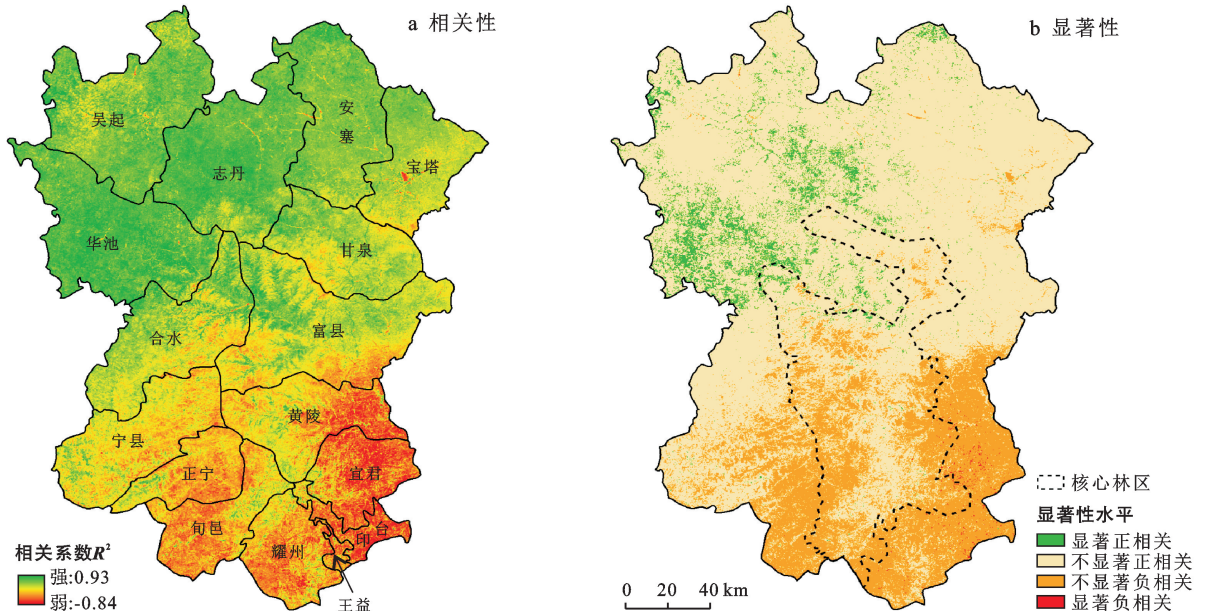


图 6 2000—2018 年子午岭区生长季增强型植被指数 EVI 与降水的相关系数及显著性检验

可以看出,子午岭区生长季 EVI 与降水主要以不显著相关为主(94.54%)。两者呈显著正相关地区(5.34%)主要为子午岭区西北部,如华池、志丹、吴起、安塞等;两者呈显著负相关地区(0.12%)很小,主要在子午岭区东南部黄陵、宜君、印台、王益等地零星分布;呈不显著负相关地区(21.84%)主要为子午岭区南部,如宁县、正宁、旬邑、黄陵、耀州、王益、宜君和印台等;呈不显著正相关地区(72.70%)主要为子午岭区北部,如吴起、安塞、宝塔、甘泉、合水、富县。而核心林区生长季 EVI 与降水主要以不显著相关为主,说明降水的变化对核心林区 EVI 的影响不显著。

3.4 子午岭区 EVI 变化的人为影响

利用残差分析法分析 2000—2018 年人类活动对研究区 EVI 的影响(图 7)可知,人类活动对研究区 EVI 变化呈正向影响区域(29.82%)主要分布在子午岭北部片区,如吴起、志丹、安塞、宝塔、宁县、甘泉等;呈消极影响地区(1.53%)极少且主要分布在宝塔区城镇附近;无显著影响地区(68.65%)主要分布在子午岭中部地区(特别是核心林区),如华池、志丹、甘泉、富县、黄陵、宜君等。总的来说,人类活动对子午岭周边 EVI 变化产生正向影响,但对核心林区 EVI 变化的影响不显著。

3.5 气候变化和人为影响对子午岭区 EVI 变化的贡献度

通过对子午岭区生长季真实 EVI 值、预测 EVI 值以及残差值的趋势变化分析,得到气候变化以及人为影响对 EVI 变化的贡献度(图 8)。由图 8 可知子

午岭区植被覆盖的变化主要是因为人类活动和气候变化共同影响(图 8a),且人类活动贡献度更高。整体上气候变化对植被覆盖的贡献度为 28.19%,人类活动贡献度为 71.81%。在植被增长的地区,气候变化的贡献度主要集中在 20%~40%(图 8b)。人类活动贡献度主要为 60%~80%,大于 80%的地区主要分布在安塞、宝塔、正宁、旬邑等(图 8c)。在植被覆盖减少的地区,如宝塔及耀州的城镇地区,主要是由于人类活动以及气候变化的共同影响或只受人类活动影响,其中,气候变化贡献率小于 20%。在核心林区,人类活动的贡献度为 67.30%。

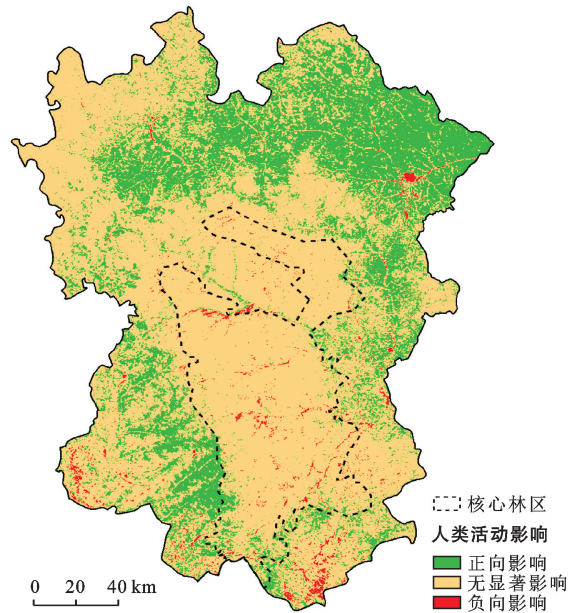


图 7 2000—2018 子午岭区人类活动对生长季 EVI 的影响

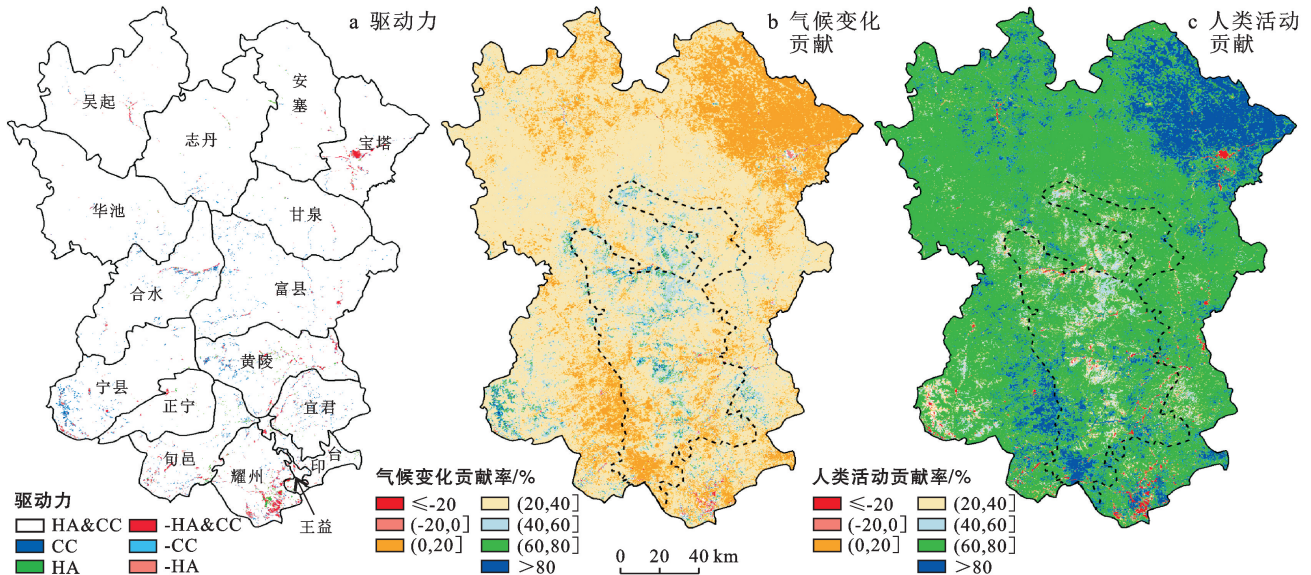


图 8 2000—2018 年子午岭区气候变化及人类活动贡献度

注:HA&CC 为气候变化和人类活动共同导致植被覆盖增加;CC 为气候变化导致植被覆盖增加;HA 为人类活动导致植被覆盖增加;-HA&CC 为气候变化和人类活动各共同导致植被覆盖减少;-CC 为气候变化导致植被覆盖减少;-HA 为人类活动导致植被覆盖减少。

4 讨论与结论

4.1 讨论

2000—2018 年来子午岭区生长季(4—10 月)植被覆盖有明显改善,EVI 整体以 0.055/10 a 的趋势增长;子午岭区 EVI 与气温、降水主要以不显著相关为主,气候变化对子午岭区 EVI 变化的贡献度为 28.19%,人类活动的贡献度为 71.81%。说明其植被改善主要受人类活动影响。研究区 2000—2018 年气候相对稳定,大规模植被建设促进了子午岭区的植被生长和恢复,与 2000 年相比,子午岭区耕地面积减少 1 691.19 km²,林地和草地面积分别增加 629.27 km², 911.77 km²;但同时降低了植被覆盖与气候变化的相关性^[28]。通过进一步对比子午岭核心林区及其周边区域多年植被变化差异发现,周边区域(增长趋势为 0.061/10 a)植被整体改善的贡献大于核心林区(增长趋势为 0.038/10 a),人类活动对周边区域 EVI 均值主要为正向影响。受退耕还林还草工程^[24,29]和生态工程建设^[30]的影响,子午岭周边区域植被覆盖得以改善。同时技术的进步提高了农业生产率,农业实践的改善提高了粮食生产率,能够缓解周边区域农业生产对自然环境资源的负担,对促进植被恢复呈现积极作用^[31]。核心林区植被覆盖主要以改善为主,核心林区 EVI 均值与气温、降水相关性不显著,这与赵润东^[32]、肖强等^[33]在黄土高原研究结果一致(黄土高原森林区植被 NDVI 与温度、降水的相关性不明显)。而人类活动对核心林区 EVI 变化的贡献度为 67.30%,但对其变化影响不显著,这可能是因为核心林区主要为国家级自然保护区,由于人类的保护使其覆盖度增加,同时人类活动的扰动相对较少,核心林区植被覆盖本底相对较好,生态恢复和人类活动带来的 EVI 增加相对不明显。但仍需加强核心林区森林保护、管理和监测等,减少人类活动的负面影响。

子午岭区 EVI 变化速率小于 0 和人类活动为消极影响的区域主要为建设和居住用地,这主要是新型城镇化、新农村建设等引起的。2000—2018 年子午岭区建设和居住用地面积增加 132.22 km²,城镇化的快速发展使得城镇周边的 EVI 均值下降,同时城镇化进程加速了农村人口的迁出,城市人口增长使城市资源进一步开发和破坏,使得其周围植被覆盖减少。总的来说,子午岭区植被恢复和建设的生态效益明显,植被 EVI 有所提高。

本文基于 MODIS EVI 数据,揭示了子午岭区 2000—2018 年 EVI 时空变化及其对气候变化的响应、人类活动对该区域产生的影响,定量分析了两

对研究区植被 EVI 变化的贡献度,可为典型林区植被监测和生态建设成效评价提供科学依据。但是,植被 EVI 值的变化受多种因素的共同作用。本文气候因素只选取了气温和降水这两个主要因素,在以后的研究中可选取更多气候指标。例如,蒸散发、日照时数、干旱数据等分析气候因子和植被覆盖的相关关系。此外,尽管本文利用残差分析法构建线性方程得到人类活动对植被覆盖度的影响,同时定量分析了人类活动的贡献度,但人类活动复杂多样,仍需要进一步进行人类活动对植被覆盖的调查和监测研究。后续的研究中应考虑不同的人类活动对植被覆盖的影响,考虑使用驱动机制、非线性方法等更加准确地揭示 EVI 与人类活动关系。

4.2 结论

2000—2018 年子午岭区生长季(4—10 月)EVI 平均值范围为 0.003~0.549,19 a 来研究区 EVI 变化速率为(-0.19~0.25)/10 a,整体以 0.055/10 a 的趋势增长,其中子午岭核心林区 EVI 以 0.038/10 a 的趋势增长($R^2=0.6798$),周边区域 EVI 以 0.061/10 a 的趋势增长($R^2=0.8997$);子午岭区植被覆盖度约为 46%,整体以极显著改善为主,主要以子午岭区北部的吴起、志丹、安塞、宝塔、华池等县区为主,但核心林区中部 EVI 变化不显著。

子午岭区植被覆盖的变化主要是因为人类活动和气候变化共同影响,但整体上气候变化对植被覆盖的贡献度为 28.19%,子午岭区 2000—2018 年植被 EVI 均值与年均温和年累积降水以不显著相关为主,EVI 均值与气温均值呈显著负相关的区域主要为子午岭区东北部;呈显著正相关主要为子午岭区东南少部分区域。EVI 均值与降水呈显著正相关地区主要为子午岭区西北部的极少部分;呈显著负相关地区主要在子午岭区东南部零星分布。气温或者降水的变化对核心林区的影响不显著。人类活动对植被覆盖的贡献度为 71.81%,人类活动对子午岭周边区域(如吴起、志丹、安塞、宝塔、宁县、甘泉等县区)EVI 的变化以正向影响为主,但对核心林区 EVI 变化的影响不显著。

[参 考 文 献]

- [1] He Dong, Yi Guihua, Zhang Tingbin, et al. Temporal and spatial characteristics of EVI and its response to climatic factors in recent 16 years based on grey relational analysis in Inner Mongolia autonomous region, China [J]. Remote Sensing, 2018,10(6):961.
- [2] 陈效速,王恒.1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J].地理学报,2009,64(1):84-94.

- [3] Dutta D, Das P K, Paul S, et al. Assessment of ecological disturbance in the mangrove forest of Sundarbans caused by cyclones using MODIS time-series data (2001—2011) [J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(2):775-790.
- [4] 李美丽,尹礼昌,张园,等.基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究[J].*生态学报*, 2021, 41(3):1138-1147.
- [5] 陈燕丽,罗永明,莫伟华等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异[J].*自然资源学报*, 2014, 29(10):1802-1812.
- [6] 程乾,黄敬峰,王人潮. MODIS 和 NOAA /AvHRR 植被指数差异初步分析[J].*科技通报*, 2005, 21(2):205-209.
- [7] 杨嘉,郭锐,贾建华.西北地区 MODIS/NDVI 与 MODIS/EVI 对比分析[J].*干旱气象*, 2007, 25(1):38-43.
- [8] Patasaraiya M K, Devi R M, Sinha B, et al. Understanding the resilience of sal and teak forests to climate variability using NDVI and EVI time series [J]. *Forest Science*, 2021, 67(2):192-204.
- [9] Sedighifar Z, Motlagh M G, Halimi M. Investigating spatiotemporal relationship between EVI of the MODIS and climate variables in northern Iran [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2020, 17(2):733-744.
- [10] 张艳可,王金亮,农兰萍,等.基于 MODIS 时序数据北回归线(云南段)地区植被物候时空变化及其对气候响应分析[J].*生态环境学报*, 2021, 30(2):274-287.
- [11] 田志秀,张安兵,王贺封,等.锡林郭勒盟不同草原类型 EVI 的时空变化及其对气候的响应[J].*草业科学*, 2019, 36(2):346-358.
- [12] Zhao Yao, Li Meng, Deng Jiayong, et al. Afforestation affects soil seed banks by altering soil properties and understory plants on the eastern Loess Plateau, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126:107670.
- [13] Wang Jing, Zhao Wenwu, Wang Guan, et al. Effects of long-term afforestation and natural grassland recovery on soil properties and quality in Loess Plateau (China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 770:144833.
- [14] Cao Shixiong, Chen Li, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration [J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 104(4):240-245.
- [15] 山仑,徐炳成.新时期黄土高原退耕还林(草)有关问题探讨[J].*水土保持通报*, 2019, 39(6):295-297.
- [16] 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.
- [17] 董懿,尹冬勤,李渊,等.黄土高原植被的时空变化及其驱动力分析研究[J].*中国农业大学学报*, 2020, 25(8):120-131.
- [18] 刘静,温仲明,刚成诚.黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应[J].*生态学报*, 2020, 40(2):678-691.
- [19] 孟晗,黄远程,史晓亮.黄土高原地区 2001—2015 年植被覆盖变化及气候影响因子[J].*西北林学院学报*, 2019, 34(1):211-217.
- [20] 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.
- [21] 魏宏征,肖战峰,何小军,等.甘肃子午岭林区不同林分水源涵养能力研究[J].*林业资源管理*, 2020(4):87-94.
- [22] 杨艳芬,王兵,王国梁,等.黄土高原生态分区及概况[J].*生态学报*, 2019, 39(20):7389-7397.
- [23] 徐佳,王略,王义,等.2000-2017 年神东矿区植被 NDVI 时空动态[J].*水土保持研究*, 2021, 28(1):153-158.
- [24] 曹二佳.基于 VSD 模型的子午岭区生态脆弱性时空变化[D].甘肃 兰州:兰州大学, 2020.
- [25] Zhou Zhaoqiang, Ding Yibo, Shi Haiyun, et al. Analysis and prediction of vegetation dynamic changes in China: Past, present and future [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117:106642.
- [26] 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.
- [27] 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[J].*水土保持通报*, 2021, 41(1):327-336.
- [28] 李斌,张金屯.黄土高原地区植被与气候的关系[J].*生态学报*, 2003, 23(1):85-89.
- [29] 张建香,胡爱萍,张多勇.陕甘宁黄土高原区植被覆盖空间格局演变[J].*西北师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(5):71-76.
- [30] 李依璇,朱清科,石若莹,等.2000—2018 年黄土高原植被覆盖时空变化及影响因素[J].*中国水土保持科学*, 2021, 19(4):60-68.
- [31] Bryan B A, Gao Lei, Ye Yanqiong, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency [J]. *Nature*, 2018, 559(7713):193-204.
- [32] 赵瑞东.气候变化和人类活动对黄土高原植被 NDVI 的影响研究[D].甘肃 兰州:西北师范大学, 2018.
- [33] 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.