

DOI: 10.5846/stxb202106241686

王一, 郝利娜, 许强, 李佳琴, 常浩. 2001—2019 年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析. 生态学报, 2023, 43(6): 2397-2407.

Wang Y, Hao L N, Xu Q, Li J Q, Chang H. Spatio-temporal variations of vegetation coverage and its geographical factors analysis on the Loess Plateau from 2001 to 2019. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2397-2407.

2001—2019 年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析

王 一¹, 郝利娜^{1,2,*}, 许 强², 李佳琴¹, 常 浩¹

1 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

2 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059

摘要: 探究黄土高原植被覆盖度变化及其与地理因子之间的关系有助于区域植被恢复政策的优化以及人地关系的协调发展。因此, 以 MOD13 A1 数据作为数据基础, 采用趋势分析、标准差和重心迁移模型, 研究 2001—2019 年黄土高原植被覆盖度 FVC (Fractional Vegetation Cover) 时空演化特征, 并结合地理探测器和相关分析对影响 FVC 的地理因子进行解析。结果表明: (1) 2001—2019 年黄土高原植被覆盖度恢复状况较好, FVC 平均增速为 0.0095/a, 呈东南高西北低分布, 极显著、显著增加的区域面积占比为 84.37%, 研究区各年 FVC 重心位于陕北一带, 19 年向北推进 55.1km; (2) 各地理因子对 FVC 的解释力存在显著差异, 降水、土壤类型、气温、土地利用类型和坡度是 FVC 空间分布的主要驱动因子, 且各因子之间交互作用的解释力高于单因子; (3) FVC 与气温、降水相关系数均以正相关为主; FVC 均值与变化趋势存在地形、土壤、人口密度、土地利用分异特征; 土地利用转移可体现人类活动特征, 其退耕还林还草、未利用地绿化等积极效应促使区域植被得到显著改善, 城市扩张等消极效应则抑制植被增长。

关键词: 植被覆盖度; 时空演化; 地理因子; 地理探测器; 黄土高原

Spatio-temporal variations of vegetation coverage and its geographical factors analysis on the Loess Plateau from 2001 to 2019

WANG Yi¹, HAO Lina^{1,2,*}, XU Qiang², LI Jiaqin¹, CHANG Hao¹

1 College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Exploring the relationship between vegetation coverage change and geographical factors on the Loess Plateau is conducive to the optimization of regional vegetation restoration policies and the coordinated development of man-land relations. Therefore, based on MOD13A1 data, using trend analysis, standard deviation and gravity migration model, the temporal and spatial evolution characteristics of FVC (Fractional Vegetation Cover) in Loess Plateau from 2001 to 2019 were studied, and the geographical factors affecting FVC were analyzed with GeoDetector and correlation analysis. The results show that: (1) the vegetation coverage recovery of the Loess Plateau was good from 2001 to 2019, and the average growth rate of FVC was 0.0095/a, with a high distribution rate in southeast and low distribution rate in northwest, and the area proportion of extremely significant and significantly increased was 84.37%. The center of gravity of FVC in the study area each year was located in northern Shaanxi, and it advanced 55.1km northward in 19 years. (2) There were significant differences in the explanatory power of each geographical factor on FVC. Precipitation, soil type, air temperature, land use

基金项目: 中国博士后科学基金特别资助项目 (2020T130074); 国家自然科学基金重大项目 (41790445); 中国博士后科学基金面上资助项目 (2017M622982)

收稿日期: 2021-06-24; 网络出版日期: 2022-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hao_ln@qq.com

type and slope were the main driving factors of FVC spatial distribution, and the explanatory power of interaction among the factors was higher than that of the single factor. (3) The correlation coefficient of FVC with temperature and precipitation was mainly positive, and the mean value and trend of FVC were characterized by terrain, soil, population density and land use differentiation. Land use transfer can reflect the characteristics of human activities, and its positive effects, such as returning farmland to forest and grassland, greening unused land and so on, can significantly improve regional vegetation, while the negative effects, such as urban expansion, can inhibit vegetation growth.

Key Words: vegetation coverage; spatio-temporal variations; geographical factors; GeoDetector; the Loess Plateau.

植被作为陆地生态系统中与大气、土壤和水文等生态要素紧密联系的枢纽,在水土保持、气候调节、碳氮循环等生态系统功能中发挥着不可或缺的作用^[1-2],同时植被对生态环境的变化具有颇高敏感性^[3]。因此,研究植被变化及其与自然环境、人类活动之间的关系,可揭示生态环境演化情况及其响应机制,为区域生态环境的治理与管理提供理论依据。

植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)是指植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比^[4],它是在归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)基础上改进提出^[5],其可量化植被生态势态、茂密程度和生物量等,被广泛应用于水文、生态、气候等领域^[6-8]。目前,关于中国不同区域植被覆盖度变化进行了诸多研究,如中国北方地区^[9]、西南地区^[10]、秦岭地区^[11]、三峡库区^[12]以及长江流域^[13]等不同时空尺度的植被覆盖度变化特征研究,对比可发现各地区具有明显的区域差异性,并且均与气候因子存在相关性;部分研究还认为人类活动对植被生长有着积极、消极效应^[10-11]。此外,植被覆盖度亦与地形分异有关^[13-14]。

黄土高原作为我国西北最为典型的生态环境脆弱区,自1999年黄土高原实施退耕还林还草、植树造林等生态工程以来^[15],土地覆被与区域环境发生很大改变^[16-17],其植被变化备受关注。张宝庆等^[18]、信忠保等^[19]认为1999年以后黄土高原植被显著增加;刘静等^[20]、Zhao等^[21]利用相关分析研究植被对气候变化的响应发现降水是主要驱动因子;刘旻霞等^[22]、Shi^[23]等采用残差分析以区分气候与人类活动对植被变化的贡献。上述研究仅探讨降水、气温与人类活动对黄土高原植被变化的影响,未能系统地研究气候、地形、水文、土壤和人类活动的驱动机制以及内部因子的交互作用,忽略了黄土高原地理环境的差异性与整体性。因此,本文以MOD13A1数据为基础,采用趋势分析、标准差和重心迁移模型,分析黄土高原FVC时空演化特征,结合地理探测器与相关分析,综合探究黄土高原FVC与各地理因子之间的关系,以全面分析植被覆盖度变化规律及原因,为黄土高原未来分区生态环境建设和人地关系的协调发展提供决策参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄土高原位于中国内陆西北部,黄河中游地区,地跨100°54′—114°33′E与33°43′—41°16′N之间,总面积约63万km²,辖7个省和自治区、334个县级行政区(图1)。黄土高原境内地势起伏大,由西北向东南逐渐降低,海拔高差超过5000m;地貌复杂,其中包含平原、高原、盆地、山地、丘陵。黄土高原气候属大陆性季风气候,年平均气温在3.6—14.3℃左右;降水偏少,年降水量150—750mm;其土地覆被类型主要以草原、耕地为主,是中国西北重要的旱作农业区^[17]。

1.2 数据来源及预处理

本研究使用的MODIS植被指数产品MOD13A1数据来源于美国国家航空航天局(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>),时间分辨率为16 d,空间分辨率为500 m,时间跨度为2001年1月—2019年12月。利用MRT(MODIS Reproject Tools)软件对该数据进行拼接、格式转换和重投影等,并采用最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)进一步消除云、大气等因素干扰^[24-25],得到逐月NDVI数据,进而计算出

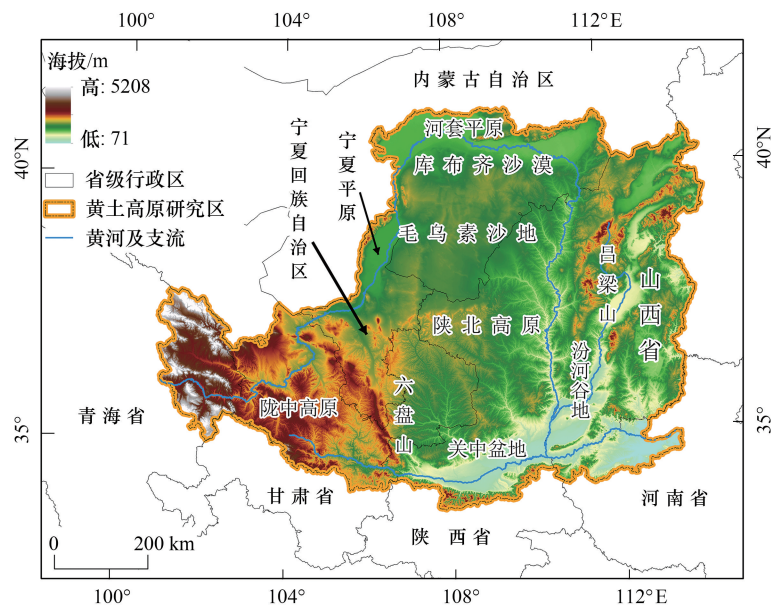


图1 黄土高原研究区高程及行政区划

Fig.1 Elevation and administrative divisions of the Loess Plateau study area

2001—2019 年逐年 NDVI 均值。

气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 选取 2001—2019 年黄土高原及其周边共 103 个气象站点的逐年平均气温和降水数据。剔除个别站点缺失或异常数据, 采用克里金法 (Kriging) 对气象数据进行空间插值^[20], 并将其分辨率与 NDVI 数据保持一致。

地形数据采用 SRTM90 m 的 DEM 数据, 并从中提取坡度与坡向; 土壤数据采用《1:100 万中华人民共和国土壤图》数字产品; 2000 和 2018 年土地利用数据采用中国土地利用现状遥感监测数据库。以上数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 并重采样为 500m 分辨率。

水系、交通数据来源于全国地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/>), 采用线密度法生成水系、交通密度栅格数据。县域社会经济数据来源于黄土高原各省统计年鉴, 并结合县级行政区面积计算各县 GDP 密度和人口密度。

2 研究方法

2.1 像元二分模型

为降低无植被区域的影响, 采用像元二分模型计算植被覆盖度, 公式如下^[7]:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中: FVC 为植被覆盖度; NDVI 为归一化植被指数; $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 分别为无植被覆盖和完全被植被覆盖地表的 NDVI 值。结合研究区植被覆盖现状, 分别选取累计频率为 5% 和 95% 的 NDVI 值作为 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 。

2.2 趋势分析

为定量反映研究区内植被覆盖度的时空变化, 采用一元线性回归逐像元计算 FVC 的年际变化趋势, 公式如下^[20,25]:

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times FVC_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n FVC_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: θ_{slope} 为回归斜率; n 为监测的总年份 ($n = 19$); i 为时间变量 ($i = 1-19$); FVC_i 为第 i 年 FVC 值。当 $\theta_{\text{slope}} > 0$, 表示 FVC 在研究时间段内呈增加趋势; 反之, 则呈下降趋势。采用 F 检验法对其进行显著性检验, 根据检验结果分为 5 类: 极显著增加 ($\theta_{\text{slope}} > 0, P < 0.01$)、显著增加 ($\theta_{\text{slope}} > 0, 0.01 < P < 0.05$)、保持稳定 ($P > 0.05$)、显著退化 ($\theta_{\text{slope}} < 0, 0.01 < P < 0.05$)、极显著退化 ($\theta_{\text{slope}} < 0, P < 0.01$)。

2.3 标准差分析

标准差是衡量一组地理数据与平均值离散程度的方法, 可以反映其稳定或波动程度, 公式如下^[25-26]:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{FVC}_i - \overline{\text{FVC}})^2} \quad (3)$$

式中: SD 为研究时间段内 FVC 的标准差; $\overline{\text{FVC}}$ 为研究时间段内 FVC 的多年均值。 SD 越大, 表示 FVC 变化越不稳定; 反之, 则越稳定。

2.4 重心迁移模型

重心迁移模型可反映研究区内植被在时空变化中的空间聚集和迁移特征, 公式如下^[27]:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n P_i X_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, Y = \frac{\sum_{i=1}^n P_i Y_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (4)$$

式中: X, Y 分别为 FVC 分布重心的经纬度坐标; P_i 为第 i 个像元的 FVC 值; X_i, Y_i 分别为第 i 个像元中心的经纬度坐标。

2.5 地理探测器

地理探测器是探究空间分异性以及揭示其背后驱动力的一种统计学方法, 主要包括因子探测、交互探测、风险探测和生态探测。而本研究仅选用地理探测器的因子探测和交互探测来解析研究区内影响植被的地理因子, 公式如下^[28]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: q 为地理因子 X 的解释力; L 为因变量 FVC 或地理因子 X 的分类或分区; h 为分区变量 ($h = 1, \dots, L$); N_h 和 σ_h^2 分别为子区域 h 的样本数和方差; N 和 σ^2 分别为研究区整体的单元数和方差。 q 取值范围为 $[0, 1]$, 其值越大表示地理因子 X 对 FVC 空间分异的影响越强。

交互探测用于识别两个地理因子之间的交互作用, 是否会增强或减弱对因变量 FVC 的影响, 或两因子的作用是相互独立的。评估方法: 首先分别计算两因子 X_1 和 X_2 的 q 值: $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$; 再计算两因子交互的 q 值: $q(X_1 \cap X_2)$; 最后比较 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 和 $q(X_1 \cap X_2)$ 。交互探测结果分为 5 类: 非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强。

2.6 相关分析

为研究地理因子对植被的影响, 逐像元计算 FVC 与地理因子之间的相关系数, 公式如下^[20]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中: r_{xy} 为两个变量之间的相关系数; x_i 为第 i 年 FVC 均值, y_i 为第 i 年年降水或年均气温; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为研究时间段内 x 和 y 多年均值。 r_{xy} 取值范围为 $[-1, 1]$ 。若 $r_{xy} > 0$, 表示两个变量呈正相关; 若 $r_{xy} < 0$, 表示两个变量呈负相关; 其绝对值越大, 相关性越强, 反之, 则越弱。采用 t 检验法对相关系数进行显著性检验。

3 结果与分析

3.1 植被 FVC 年际变化特征

根据黄土高原 2001—2019 年各年份 FVC 均值得到研究区多年年际变化趋势 (图 2)。结果表明, 黄土高

原近 19 年来植被 FVC 平均增速为 $0.0095/a$, 整体上呈现出稳定上升趋势 ($R^2 = 0.9473$), 且波动幅度较小 ($SD = 0.0536$)。其中, FVC 均值由 2001 年最低值 0.2891 增长至 2019 年 0.4915, 2018 年达到峰值 0.4943, 19 年间增幅为 70.01%。

3.2 植被 FVC 空间分布特征

黄土高原 2001—2019 年 FVC 多年均值空间分布整体呈现出由东南向西北逐渐递减的分布格局(图 3)。研究区内高值区 ($FVC > 0.55$) 占总面积的 29.36%, 其主要分布在山西吕梁山脉一带及其东侧、六盘山和秦岭以及陕北高原南部等地, 其中极高值区 ($FVC > 0.75$) 的分布与山脉走向和区域海拔的高低较为一致, 这些区域多以森林、草地和耕地为主; 而极低值区 ($FVC < 0.15$) 面积占比为 21.25%, 主要集中于内蒙古毛乌素沙地和库布齐沙漠、宁夏中部和陇中高原以北等地, 其中宁夏平原和河套平原为农业灌溉区, FVC 均值高于周围的沙漠。

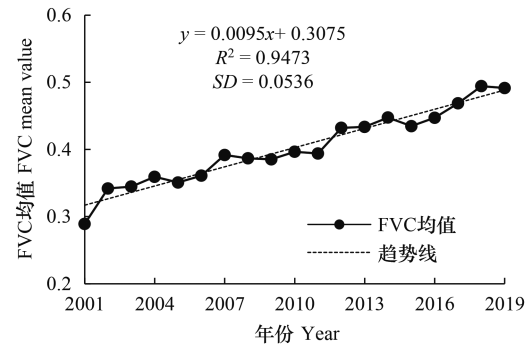


图 2 黄土高原 2001—2019 年 FVC 年际变化

Fig.2 Interannual variation of FVC in the Loess Plateau from 2001 to 2019

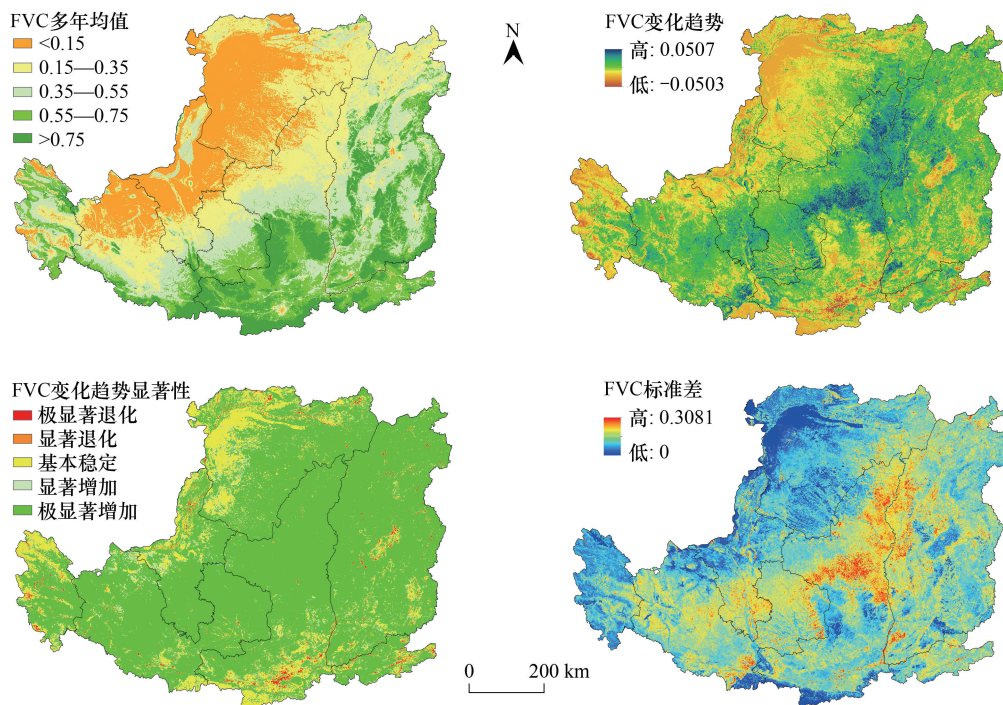


图 3 黄土高原 2001—2019 年 FVC 多年均值, 变化趋势, 变化趋势显著性和标准差

Fig.3 Multiannual mean value, trend, significance test and standard deviation of FVC in the Loess Plateau from 2001 to 2019

研究区 FVC 变化趋势介于 $(-0.0503—0.0507)/a$ 之间, 呈增加趋势的区域面积占比为 94.35%。结合 FVC 变化趋势显著性检验可知, 呈极显著、显著增加的区域面积占比为 84.37%; 而呈极显著、显著退化的区域面积占比仅占 1.01%, 零散分布于关中盆地与汾河谷地以及各省城市周围, 整体上黄土高原大面积植被得到显著改善。结合 FVC 标准差可知, SD 值介于 $0—0.3081$ 之间, 其中, 高植被覆盖度区域与低植被覆盖度区域的 SD 值更小, 其变化更为稳定, 这类地区以山脉林地和沙漠为主, 前者因植物群落经历长期物种竞争演化成稳定的生态系统, 其生产力处于顶端地位, 增长空间较小^[29]; 后者因地理环境长期不适于植被生长发育, 甚至

存活,其植被活动近乎没有。而波动较大的区域集中于陕北至吕梁山西侧一带,这一带植被覆盖度处于中等偏低水平,植被恢复潜力较大,陕西北部生态工程建设使植被恢复可受到积极影响。

3.3 植被 FVC 重心迁移

依据《黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030 年)》,黄土高原从地貌上可分为盆地河谷区、丘陵沟壑区、高原沟壑区与平原农灌和高原沙漠区,并以 5 年为时间间隔,分别计算各区域 FVC 重心变化轨迹(图 4)。其中,平原农灌和高原沙漠区重心向西南迁移,迁移距离为 53.96km;高原沟壑区重心呈折线型向西北迁移,迁移距离为 29.09km;盆地河谷区与丘陵沟壑区重心分别向东北和西北推进,迁移距离分别为 26.88km、38.47km。而黄土高原各年 FVC 重心位于研究区中部陕北一带,19 年以来存在北移趋势,迁移距离为 55.1km。总体而言,毛乌素沙地、陇中高原和陕北至吕梁山一带植被恢复可对各区域 FVC 重心产生拉力效应。

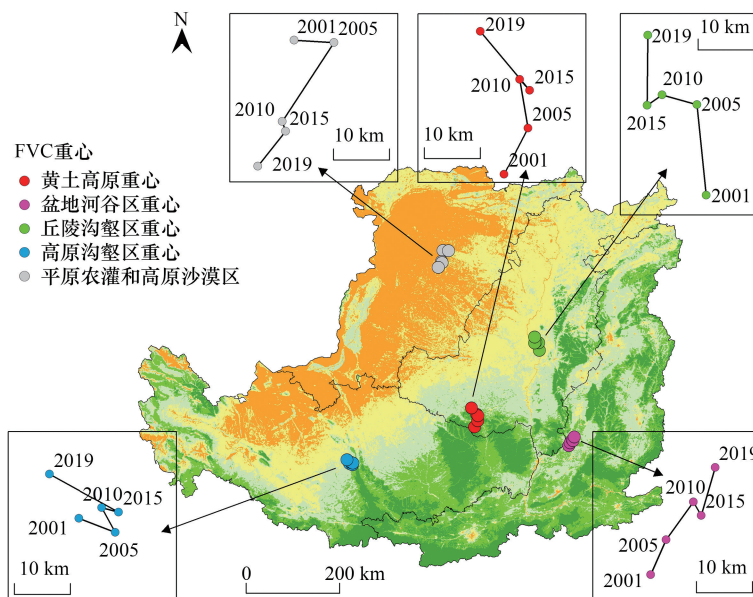


图 4 黄土高原 2001—2019 年 FVC 重心迁移

Fig.4 FVC barycenter migration in the Loess Plateau from 2001 to 2019

3.4 地理因子对植被 FVC 的贡献

本文从气候、地形、水文、土壤和人类活动五个层面出发,选取降水、气温、高程、坡度、坡向、水系密度、土壤类型、GDP 密度、人口密度、交通密度和土地利用类型 11 个地理因子,利用自然断点法对其分类,并引入地理探测器模型计算各地理因子对植被 FVC 的解释力(表 1)。

因子探测结果表明,黄土高原地理因子对 FVC 的解释排序从大到小依次为:降水(0.666)>土壤类型(0.343)>气温(0.338)>土地利用类型(0.315)>坡度(0.207)>人口密度(0.176)>高程(0.07)>GDP 密度(0.047)>水系密度(0.035)>坡向(0.001)=交通密度(0.001)。其中,降水、土壤类型、气温、土地利用类型和坡度对 FVC 的解释力大于 0.2,为主要驱动因子;人口密度、高程的解释力大于 0.05,为次要驱动因子;其余地理因子解释力相对微弱,且坡向与交通密度未通过 0.05 显著性水平检验。

根据交互作用探测结果,选取主要与次要驱动因子之间的探测结果(表 2),可以发现,高程 $\cap$ 降水、高程 $\cap$ 气温、坡度 $\cap$ 高程与土地利用类型 $\cap$ 高程表现为非线性增强;其余因子的交互结果表现为双因子增强。降水与各因子交互作用的解释力均大于其余因子之间的交互组合,侧面反映了降水是主控因子。高程、人口密度与各因子交互作用的解释力相比于两者单因子有明显提高,这表明高程与人口密度是间接作用于 FVC。总体而言,主次驱动因子对黄土高原 FVC 空间分布的影响较为显著,且因子之间交互作用存在协同增强现象。

表 1 黄土高原 2001—2019 年 FVC 地理因子探测结果

Table 1 The results of FVC geographical factor detection in the Loess Plateau from 2001 to 2019

	地理因子 Geographical factors	解释力 q Explanatory power	P
气候 Climate	降水	0.666	0.000
	气温	0.338	0.000
地形 Terrain	高程	0.070	0.000
	坡度	0.207	0.000
	坡向	0.001	0.132
水文 Hydrology	水系密度	0.035	0.000
土壤 Soil	土壤类型	0.343	0.000
人类活动 Human activities	GDP 密度	0.047	0.000
	人口密度	0.176	0.000
	交通密度	0.001	0.164
	土地利用类型	0.315	0.000

表 2 黄土高原 2001—2019 年 FVC 地理因子交互作用探测结果

Table 2 The results of FVC geographic factor interaction detection in the Loess Plateau from 2001 to 2019

地理因子 Geographical factors	降水 Precipitation	气温 Temperature	高程 DEM	坡度 Slope	土壤类型 Soil type	人口密度 Density of population	土地利用类型 Land-use type
降水 Precipitation	—	—	—	—	—	—	—
气温 Temperature	0.695 *	—	—	—	—	—	—
高程 DEM	0.737 #	0.433 #	—	—	—	—	—
坡度 Slope	0.708 *	0.496 *	0.369 #	—	—	—	—
土壤类型 Soil type	0.734 *	0.532 *	0.392 *	0.465 *	—	—	—
人口密度 Density of population	0.693 *	0.415 *	0.234 *	0.383 *	0.429 *	—	—
土地利用类型 Land-use type	0.775 *	0.551 *	0.403 #	0.453 *	0.531 *	0.434 *	—

“*”表示双因子增强,即 $q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$; “#”表示非线性增强,即 $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$; “—”表示无数值

3.5 植被 FVC 的地理因子解析

为进一步解析黄土高原地理因子与植被 FVC 的相关性,本文选取上述主要与次要驱动因子,采用相关分析与分区统计探究 FVC 随各因子属性变化的分布特征。

3.5.1 植被 FVC 与气候因子的相关性

黄土高原 FVC 与降水、气温的相关系数均以正相关为主(图 5)。FVC 与降水相关系数介于-0.7756—0.9310 之间,正、负相关区域分别位于黄土高原西北、东南部。正相关区域占 90.16%,其中通过 0.05 显著性水平检验的区域占 39.07%,主要位于青海至宁夏南部一带、内蒙古至山西北部一带;负相关区域占 9.84%,显著负相关区域仅占 0.0014%。FVC 与气温相关系数介于-0.9767—0.9266 之间,正、负相关区域分别占 61.59%、38.41%,其中显著正、负相关区域分别占 15.4%、7.93%,两者均零散分布于研究区各地。

3.5.2 植被 FVC 的地形因子解析

以 100m 高程和 2°坡度为间隔,分区统计 FVC 均值和变化趋势(图 6),可以发现,随海拔上升,FVC 均值呈现“先剧烈波动后缓慢上升,再下降”的特征;FVC 变化趋势呈现“先波动上升后下降”的特征。低海拔区(<1000m)的 FVC 均值接近峰值,其增速达到最大 0.0114/a,且波动幅度大;中海拔区(1000—2000m)两者相对稳定,FVC 增速处于高值区间;高海拔区(>2000m)的 FVC 均值达到峰值 0.6206 后转为急速降低,其增速逐渐变缓。

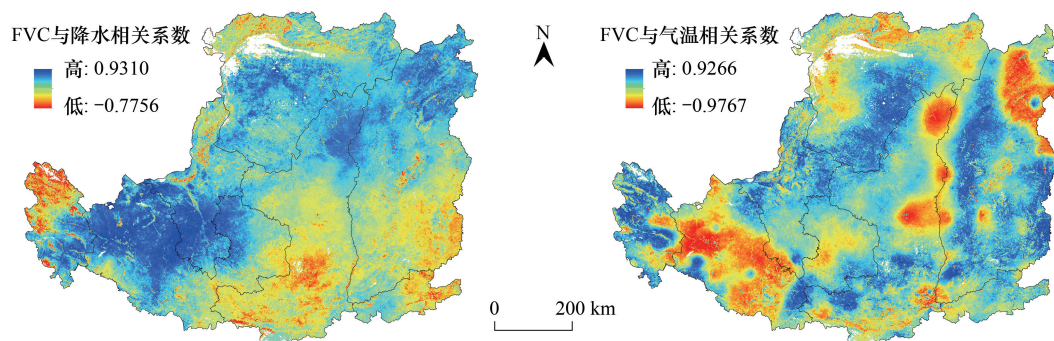


图5 黄土高原 2001—2019 年 FVC 与降水及气温相关系数

Fig.5 Correlation coefficients between FVC and precipitation and temperature in the Loess Plateau from 2001 to 2019

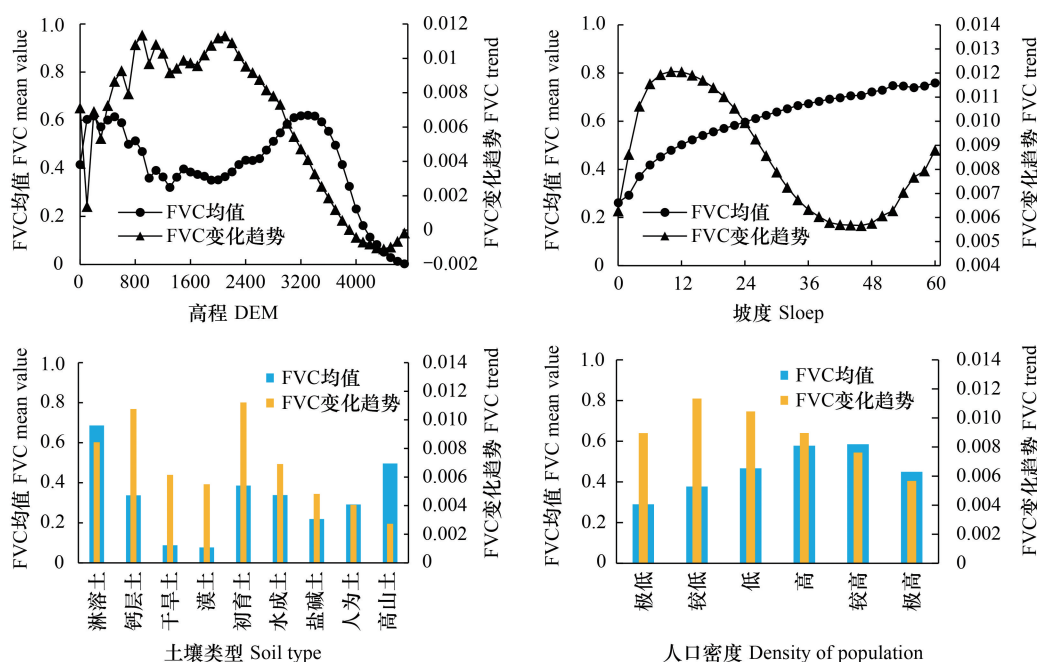


图6 FVC 均值和变化趋势与高程、坡度、土壤类型及人口密度的关系

Fig.6 Relationship between FVC mean value and its change trend and elevation, slope, soil type and density of population

就坡度而言,随坡度增加,FVC 均值稳定上升;其变化趋势呈现出“先急剧上升后下降,再上升”的特征。在 $0-12^\circ$ 时,FVC 均值处于低值区间,其增速提升至峰值 $0.0121/a$;在 $0-48^\circ$ 时,FVC 增速缓慢下降;当坡度 $>48^\circ$ 时,FVC 均值升至最大值 0.7591 ,其增速回升。

3.5.3 植被 FVC 的土壤因子解析

由各土壤类型的 FVC 均值与变化趋势可知(图 6),淋溶土的 FVC 均值最高为 0.6859 ,高山土、初育土次之。初育土的 FVC 变化趋势最大,其增速为 $0.0112/a$;钙层土、淋溶土次之。干旱土和漠土的 FVC 均值明显最低,但其增速偏高;增速最为缓慢的是高山土和人为土两种类型。

3.5.4 植被 FVC 的人类活动因子解析

由各级人口密度的 FVC 均值与变化趋势可知(图 6),人口密度高、较高、极高的区域所对应的 FVC 均值较大,其中较高区的最高值为 0.5849 ;人口密度较低、极低区域的 FVC 均值处于较低水平,但 FVC 变化趋势较大,其中,较低区的增速最大为 $0.0113/a$ 。

由黄土高原土地利用类型变化情况可知(表3),2000—2018 年黄土高原森林、水体、建设用地面积显著增加,而耕地、草地、未利用地则明显减少,土地利用转移主要以耕地、草地的转移为主。其中,耕地转为草地面积最大,为 20929 km²;森林主要转入方式为草地、耕地转向森林,其转入面积分别为 6124.5 km²、4311.5 km²;未利用地主要转出方式为草地,转出面积为 5367.5 km²。总之,退耕还林还草面积达到 25240.5 km²,未利用地绿化面积达到 7330 km²,城市扩张面积为 14561.25 km²。

土地利用转移下的植被 FVC 变化趋势总量可反映土地覆被对植被 FVC 的影响(表4)。结果表明:2018 年耕地、森林、草地 FVC 增速总量远大于水体、建设用地、未利用地。其中,退耕还林还草下的增速总量高达 1352.84/a;未利用地绿化下的增速总量为 216.1/a;城市扩张下的增速总量为 216.75/a。

表 3 黄土高原 2000—2018 年土地利用类型变化转移矩阵/km²

Table 3 Land-use change transfer matrix in the Loess Plateau from 2000 to 2018

		2018					
		耕地	森林	草地	水体	建设用地	未利用地
2000	耕地 Farmland	*	4311.5	20929	1095.25	8977.25	610.75
	森林 Forest	2243.75	*	4302.5	—	770.25	—
	草地 Grassland	17984.8	6124.5	*	717	4044.25	2977.25
	水体 Water	902.25	—	605	*	—	—
	建设用地 Construction land	2187.5	—	—	—	*	—
	未利用地 Unused land	1548	—	5367.5	—	769.5	*
	总计 Total	24866.3	10436	31204	1812.25	14561.25	3588

“*”表示土地利用类型未变化,“—”表示无数值或数值很小

表 4 黄土高原 2000—2018 年土地利用转移下 FVC 变化趋势总量矩阵/a⁻¹

Table 4 Total matrix of FVC change trend under land-use transfer in the Loess Plateau from 2000 to 2018

		2018					
		耕地	森林	草地	水体	建设用地	未利用地
2000	耕地 Farmland	*	235.71	1117.13	12.49	105.1	16.6
	森林 Forest	107.24	*	182.43	—	9.91	—
	草地 Grassland	849.67	269.37	*	14.12	83.34	66.83
	水体 Water	28.39	—	20.58	*	—	—
	建设用地 Construction land	53.64	—	—	—	*	—
	未利用地 Unused land	62.7	—	153.4	—	18.4	*
	总计 Total	1101.64	505.08	1473.54	26.61	216.75	83.43

“*”表示土地利用类型未变化,“—”表示无数值或数值很小

4 讨论与结论

4.1 讨论

黄土高原 2001—2019 年 FVC 整体呈增加趋势,这与刘旻霞^[22]、孙锐^[30]等研究结论一致。具体而言,宁夏和河套平原农灌区所处温带干旱区,因黄河灌溉之利及人类生产方式,发展为小麦、水稻等农作物的种植基地,其植被覆盖度与周围沙漠有较大差异;库布齐沙漠和毛乌素沙地大规模实施生物固沙和三北防护等工程,部分地区沙地和荒漠向耕地、草地和森林转变,植被覆盖度明显好转致使农灌和沙漠区植被重心南下迁移^[31—32]。陕北高原植被覆盖度增速最快,其中榆林、延安等地为退耕还林还草、植树造林生态工程重点区^[33];李婷^[34]亦发现陕北地区及山西交界一带植被恢复最为显著,这佐证了黄土高原植被覆盖度重心北移迹象。陕北高原南部以及吕梁山、六盘山与秦岭山区海拔较高、地势陡峭,土壤为肥力极高的淋溶土,因此高郁闭度的森林均在此处发育。关中盆地及省会城市等地,因人口聚集与城市急剧扩张,建设用地大量占用耕地、草地,人为导致植被减少^[35]。

本研究发现降水呈显著正相关区域集中于黄土高原干旱少雨的西北区,该区域大面积草本植物所需水分主要来源于降水^[30],因此对降水响应敏感;山西吕梁山及其东南部因降水丰沛,气温作用不易被水分条件所限制^[20],因此与气温相关性较强;毛乌素沙地东部草地亦对气温敏感,这是因为草本植物所需水分较之乔木灌木少,当地又实施沙地治理工程,有人为灌溉水维持^[36]。黄土高原植被存在明显的地形、土壤、人口密度以及土地利用分异特征,中高海拔山脉地区土地利用与土壤分别以森林与淋溶土为主,少有人类活动;中低海拔平原地区分别以建设用地、耕地与初育土、人为土居多,且大型城市均在此处发展,人类活动致使山区与盆地、平原的植被覆盖度状态与增速差异明显。人类活动特征可通过土地利用变化体现^[37],截止 2018 年,转为森林、草地面积为 41640km²,FVC 增速总量为 1978.62 a⁻¹,这表明退耕还林还草、植树造林、沙漠治理等政策实施有效促进黄土高原植被覆盖度增加。

综上所述,黄土高原植被覆盖度受多种地理因子影响,同时,各因子之间亦在相互作用。地形起伏可引起气温、降水的变化,局部环境的水热条件可影响土壤性质演化,进而对植被产生作用^[38]。而人类会根据自然环境选择合适的生产生活方式改变土地覆被,其中地表自然覆被的改变可再次引起土壤性质变化,如坡地退耕还林还草可增强对雨水的截留和土壤持水能力,减缓水土流失^[39],使之有效转化为植物可利用水,促进植物生长。植被大规模恢复后又造成陆地与大气间的交互作用强度发生改变,对区域气候和局地降水过程产生反馈效应^[40],最终作用于植被再恢复^[30]。在这循环累积的过程中,人类活动可左右植被变化的发展方向。

本研究仅用 19 年数据探究黄土高原植被覆盖度变化,且未考虑湿度、光照、土壤水分等对植被生长的影响。此外,通过人口密度与土地利用变化等指标量化人类活动特征较为粗糙。因此,未来研究可结合多种自然因素,进一步细化人类行为对植被产生的效应,以此探究长时间序列植被变化及其响应。

4.2 结论

本文以 MOD13A1 数据为基础,对黄土高原近 19 年植被 FVC 时空演化特征进行探究,并解析地理因子对植被覆盖度的影响。结论如下:

(1) 2001—2019 年黄土高原植被覆盖度恢复状况较好,FVC 平均增速为 0.0095/a,呈东南高西北低分布,极显著、显著增加的区域面积占比为 84.37%;研究区各年 FVC 重心位于陕北一带,19 年向北推进 55.1km,以上说明黄土高原退耕还林、自然林保护等工程促使当地植被恢复成效显著。

(2) 各地理因子对黄土高原 FVC 的解释力存在显著差异,降水、土壤类型、气温、土地利用类型和坡度是 FVC 空间分布的主要驱动因子,其因子解释力均大于 0.2,且各因子之间交互作用的解释力高于单因子。

(3) 黄土高原 FVC 与各地理因子存在相关性。其中,降水、气温与 FVC 相关系数均以正相关为主;FVC 均值与变化趋势存在地形、土壤、人口密度、土地利用分异特征;土地利用转移可体现人类活动特征,其退耕还林还草、未利用地绿化等积极效应促使区域植被得到显著改善,城市扩张等消极效应则抑制植被增长。

参考文献 (References):

- [1] Piao S L, Wang X H, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [2] 孙红雨,王长耀,牛铮,布和敖斯尔,李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204-210.
- [3] 张远东,张笑鹤,刘世荣. 西南地区不同植被类型归一化植被指数与气候因子的相关分析. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 323-330.
- [4] 贾坤,姚云军,魏香琴,高帅,江波,赵祥. 植被覆盖度遥感估算研究进展. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 774-782.
- [5] Zeng X B, Dickinson R E, Walker A, Shaikh M, DeFries R S, Qi J G. Derivation and Evaluation of Global 1-km Fractional Vegetation Cover Data for Land Modeling. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(6): 826-839.
- [6] 秦伟,朱清科,张学霞,李文华,方斌. 植被覆盖度及其测算方法研究进展. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(9): 163-170.
- [7] 张琨,吕一河,傅伯杰,尹礼唱,于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. *地理学报*, 2020, 75(5): 949-960.
- [8] 甘春英,王兮之,李保生,梁钊雄,李志文,温小浩. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析. *地理科学*, 2011, 31(8): 1019-1024.

- [9] 李钰澈, 贾坤, 魏香琴, 姚云军, 孙俊, 牟丽秋. 中国北方地区植被覆盖度遥感估算及其变化分析. 国土资源遥感, 2015, 27(2): 112-117.
- [10] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 赵旦, 吴炳方. 近 15 年中国西南地区植被覆盖度动态变化. 国土资源遥感, 2017, 29(3): 128-136.
- [11] 邓晨晖, 白红英, 高山, 刘荣娟, 马新萍, 黄晓月, 孟清. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应. 自然资源学报, 2018, 33(3): 425-438.
- [12] 孟浩斌, 周启刚, 李明慧, 陈鹏, 谭森. 基于 MODIS 像元尺度的三峡库区植被覆盖度变化的地形分布特征. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8): 1790-1799.
- [13] 张亮, 丁明军, 张华敏, 文超. 1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2084-2097.
- [14] Wang B, Xu G C, Li P, Li Z B, Zhang Y X, Cheng Y T, Jia L, Zhang J X. Vegetation dynamics and their relationships with climatic factors in the Qinling Mountains of China. Ecological Indicators, 2020, 108: 105719.
- [15] Xiao J F. Satellite evidence for significant biophysical consequences of the "Grain for Green" Program on the Loess Plateau in China. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(12): 2261-2275.
- [16] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 260-270.
- [17] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 程圣东. 黄土高原植被恢复潜力研究. 地理学报, 2017, 72(5): 863-874.
- [18] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析. 农业工程学报, 2011, 27(4): 287-293.
- [19] 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. 中国科学: D 辑, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [20] 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.
- [21] Zhao A Z, Zhang A B, Lu C Y, Wang D L, Wang H F, Liu H X. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of Grain for Green Program in Loess Plateau, China. Ecological Engineering, 2017, 104: 12-33.
- [22] 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.
- [23] Shi S Y, Yu J J, Wang F, Wang P, Zhang Y C, Jin K. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over multiple time scales on the Loess Plateau. Science of The Total Environment, 2021, 755: 142419.
- [24] Stow D A, Hope A, McGuire D, Verbyla D, Gamon J, Huenmrich F, Houston S, Racine C, Sturm M, Tape K, Hinzman L, Yoshikawa K, Tweedie C, Noyle B, Silapaswan C, Douglas D, Griffith B, Jia G S, Epstein H, Walker D, Daeschner S, Petersen A, Zhou L M, Myneni R. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(3): 281-308.
- [25] 王一, 郝利娜, 赵美龄, 许晓露, 李晨辉. 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. 水土保持研究, 2021, 28(5): 222-229.
- [26] 严恩萍, 林辉, 党永峰, 夏朝宗. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征. 生态学报, 2014, 34(17): 5007-5020.
- [27] 张兰, 沈敬伟, 刘晓璐, 朱文东. 2001—2016 年三峡库区植被变化及其气候驱动因子分析. 地理与地理信息科学, 2019, 35(2): 38-46.
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [29] 李建国, 濮励杰, 刘金萍, 李月臣, 刘丽丽. 2001 年至 2010 年三峡库区重庆段植被活动时空特征及其影响因素. 资源科学, 2012, 34(8): 1500-1507.
- [30] 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.
- [31] 闫峰, 吴波, 王艳姣. 2000—2011 年毛乌素沙地植被生长状况时空变化特征. 地理科学, 2013, 33(5): 602-608.
- [32] 郭彩霞, 韩致文, 李爱敏, 钟帅. 库布齐沙漠生态治理与开发利用的典型模式. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2017, 53(1): 112-118.
- [33] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 刘焱序, 王贺封, 王冬利. 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. 自然资源学报, 2017, 32(3): 449-460.
- [34] 李婷, 吕一河, 任艳姣, 李朋飞. 黄土高原植被恢复成效及影响因素研究. 生态学报, 2020, 40(23): 1-13.
- [35] 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.
- [36] 吴薇. 毛乌素沙地沙漠化过程及其整治对策. 中国生态农业学报, 2001, 9(3): 15-18.
- [37] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
- [38] 李金珂, 杨玉婷, 张会茹, 黄铝文, 高义民. 秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析. 生态学报, 2019, 39(22): 8504-8515.
- [39] 余新晓, 张晓明, 武思宏, 魏天兴, 张学培. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响. 山地学报, 2006, 24(1): 19-26.
- [40] 张宝庆, 田磊, 赵西宁, 吴普特. 植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(7): 1080-1091.