

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.045.

姚楠, 董国涛, 薛华柱. 基于 GoogleEarthEngine 的黄土高原植被覆盖度时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 260-268.

Yao Nan, Dong Guotao, Xue Huazhu. Analysis on the Characteristics of the Spatiotemporal Change in Vegetation Coverage on the Loess Plateau Using the Google Earth Engine[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 260-268.

基于 GoogleEarthEngine 的黄土高原植被覆盖度 时空变化特征分析

姚楠^{1,2}, 董国涛^{2,3}, 薛华柱¹

(1.河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000;

2.黄河水利委员会 黄河水利科学研究所, 郑州 450003; 3.黑河水资源与生态保护研究中心, 兰州 730030)

摘要: [目的] 探究黄土高原植被覆盖度变化的时空特征, 揭示植被对气候因子变化的时滞效应, 进而为地区生态保护与高质量发展提供数据支撑。 [方法] 基于 2001 年至 2020 年的黄土高原地区 NDVI 数据、气温和降水数据, 利用像元二分法、一元线性回归和时滞偏相关分析方法, 开展地区植被与气候因子变化关系的研究。 [结果] 过去 20 年间, 黄土高原植被覆盖度以 0.076/10 a 的速率增加, 在空间上主要呈现极显著增加, 但占总面积 38.29% 的区域植被覆盖变化波动较大。黄土高原月植被覆盖度与气温和降水呈现显著正相关关系, 其中降水是影响植被变化的主要因素。植被对降水的响应滞后时间主要集中在 3 个月, 而气温的滞后时间在空间上存在较大差异, 东南部植被主要滞后 0 至 1 个月, 而西北部植被主要滞后 2 至 3 个月。 [结论] 黄土高原植被变化主要受降水影响, 20 年间植被恢复情况良好, 但变化波动较大, 未来应继续生态保护工作进行巩固。

关键词: 植被覆盖度; GEE; 时滞相关; 气候变化; 黄土高原

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0260-09

Analysis on the Characteristics of the Spatiotemporal Change in Vegetation Coverage on the Loess Plateau Using the Google Earth Engine

Yao Nan^{1,2}, Dong Guotao^{2,3}, Xue Huazhu¹

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Henan,

Jiaozuo 454000, China; 2. Yellow River Conservancy Commission, Yellow River Institute of Hydraulic Research,

Zhengzhou 450003, China; 3. Heihe Water Resources and Ecological Protection Research Center, Lanzhou 730030, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the vegetation cover change and its response of climate factors for coping with global climate change and promoting the ecological protection and high-quality development of the Loess Plateau. [Methods] Based on NDVI, temperature and precipitation data of the Loess Plateau from 2001 to 2020, pixel dichotomy, linear regression and time lag partial correlation analysis models were used to characterize the vegetation cover change on the Loess Plateau and its response mechanism to climate factors. [Results] The annual vegetation coverage in the Loess Plateau had increased at a rate of 0.076/decade in past two decades with a predominantly significant spatial distribution of pronounced growth. The areas of vegetation cover that fluctuated greatly accounted for 38.29% of the whole area. The relationship between monthly vegetation cover, temperature and precipitation on the Loess Plateau was significantly positive correlation, and precipitation was the main factor affecting vegetation change. The lag time of vegetation response to precipitation was mainly 3 months, and the lag time of vegetation response to temperature

收稿日期: 2022-06-08

修回日期: 2022-09-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(51779099, 51779209, 51909099); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402400)

第一作者: 姚楠(1997—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事生态环境遥感研究。E-mail: ynhp97@163.com

通信作者: 董国涛(1982—), 男, 山东青州人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水文遥感研究。E-mail: dongguotao@hhglj.yrcc.gov.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

existed spatial differences between southeast (0~1 month) and northwest (2~3 months). [Conclusion] The vegetation changes in the Loess Plateau were primarily influenced by precipitation. Over the course of 20 years, there had been a favorable recovery of vegetation. However, there were significant fluctuations in this change. Future efforts should continue to focus on ecological conservation work in order to ensure the consolidation of these improvements.

Keywords: vegetation coverage; Google Earth Engine; lagged correlations; climate change; Loess Plateau

陆地生态系统对气候变化的响应是研究全球变化的重要内容,其中植被与气候变化间的联系是全球环境科学研究中最重要的问题之一^[1]。植被作为陆地生态系统的重要组成部分,对保持水土流失、调节大气成分、维持气候稳定等生态系统各方面要素的平衡具有重要作用^[2]。另一方面,植被是地球系统的主体,陆地生态系统对气候变化的响应必然在植被类型、数量或质量方面有所表现^[3]。因此,植被各方面的变化能够一定程度上代表生态系统的整体状况,对植被生长情况的长时间序列动态监测不仅是研究区域生态变化的重要方法,而且能够间接反映气候变化^[4]。植被覆盖度(Fraction of Vegetation Coverage, FVC)指植被冠层的垂直投影面积与土壤总面积之比,是反映地表植被的茂盛程度重要指标和描述生态系统状况的重要基础数据^[5]。气候变化作为影响植被覆盖变化的主导因素,各种气候因子均与植被生长变化联系紧密,其中气温与降水的影响尤为重要^[6]。在全球气候变暖、生态环境形势日益严峻的背景下,探究陆地生态系统中植被覆盖变化与气温、降水之间的关系,对维持生态平衡与保护环境稳定有着重要的意义。

黄土高原地区是世界上水土流失最为严重的地区,也是我国水土保持与生态建设工作的重点地区^[7]。植被作为生态工程建设工作的核心,能够通过林冠截流、林下草灌、枯枝落叶层的拦蓄以及根系对土壤的固结作用从而保持水土^[8]。近年来,已有许多关于黄土高原植被覆盖度变化的时空规律及其对气候因子响应机制的研究。如张家政等^[9]采用相关性分析的方法,基于相关系数结果分析了黄土高原地区气温和降水与不同季节植被覆盖度之间的相关程度;王逸男等^[10]通过分析黄土高原植被覆盖度的空间迁移趋势和降水、气温间的相关关系,发现植被覆盖度和水热因素的变化整体上保持一致;李依璇等^[11]通过计算植被覆盖度与气候因子的偏相关系数,发现黄土高原地区植被覆盖度与年降水量的相关性高于年平均气温。

综上,已有研究大多集中于黄土高原同一时期植被覆盖度与气候因子的相关关系上,对气候因子影响的滞后效应涉及较少。本文基于 MOD13A2 数据和降水、气温数据,应用 GEE 云平台计算植被覆盖度、线性变化趋

势及时滞偏相关系数等指数,分析过去 20 年黄土高原植被覆盖度的变化特征及其与气候因子在空间上的相关性和滞后效应。研究为科学认识黄土高原生态现状、开展后续生态保护提供数据支撑。

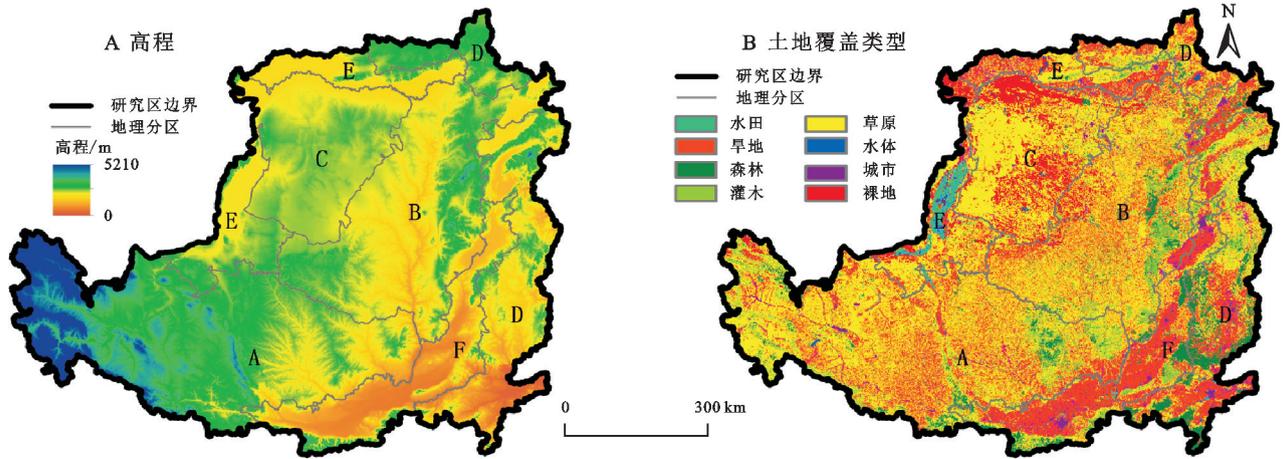
1 研究区概况

黄土高原位于北纬 32°—41°、东经 107°—114°,跨越山西、内蒙古、河南、陕西、甘肃、宁夏和青海 7 个省(自治区),总面积达 64.87 万 km²,区域大部为黄土覆盖,土壤类型主要包括黄绵土、灰漠土、风沙土、栗钙土等,粉粒占黄土总量的 50%。研究区地势总体上呈现西北高、东南低,区域内海拔差异较大,地貌类型丰富(图 1A),其中山区、丘陵区、高塬区占 2/3 以上。该区属大陆性季风气候,春冬季寒冷干燥,夏秋季炎热多雨,多年平均气温 3.6~14.6℃,多年平均降水 200~800 mm。区域内以草原为主要土地覆盖类型,面积占比 41.68%,耕地次之,占比为 31.19%,森林和灌木林占比分别为 9.02%与 6.31%。属于城市和裸地的区域分别占比 3.64%,6.76%,剩余地区则由水体覆盖(图 1B)。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

计算植被覆盖度所需的 NDVI 数据采用美国国家航空航天局(NASA)提供的 MOD13A2 数据,该数据的时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 1 000 m。本次研究基于 GEE 平台筛选出 2001—2020 年 MOD13A2 数据,并采用最大值合成法得到逐年月的植被指数数据。降水与气温数据来源于时空三极环境大数据平台(<http://poles.tpdc.ac.cn/>)2001—2020 年的逐月降水量与平均气温数据集^[12],空间分辨率为 1 000 m。土地覆盖类型数据选用中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)提供的 2015 年中国土地利用现状遥感监测数据,空间分辨率为 1 000 m,包括水田、旱地、森林、灌木、草原、水体、城市和裸地 8 种土地覆盖类型。非 GEE 平台集成的气象数据和土地覆盖类型数据经 Python 程序预处理后,上传至 GEE 云平台进行统一在线调用。



注:A代表黄土高原沟壑区,B代表黄土丘陵沟壑区,C代表沙地和沙漠区,D代表土石山区,E代表农灌区,F代表河谷平原区。

图1 黄土高原高程和土地覆盖类型空间分布

Fig. 1 Map of spatial distribution of elevation and land cover types in the Loess Plateau

2.2 研究方法

2.2.1 Google Earth Engine 云平台 Google Earth Engine(GEE)云平台是由谷歌公司提供的对大量全球尺度地球科学资料进行在线可视化计算分析处理的平台,由支持多PB分析的数据目录和高性能的计算服务组成^[13]。依托于海量的云存储数据和强大的计算能力,GEE在大规模植被变化分析中得到了广泛应用^[14-15]。本次研究涉及20年来黄土高原植被覆盖度的计算和分析,研究范围广、时间跨度长,使用GEE云平台相较传统处理方式在硬件要求和处理速度方面更具优势。综上,本文将数据筛选、植被覆盖度计算及后续线性回归分析等过程均部署到GEE平台。

2.2.2 植被覆盖度的计算 植被覆盖度与NDVI之间存在显著相关性,通常以建立两者间转换关系的方式直接提取植被覆盖度信息。本次研究采用像元二分法^[16]计算植被覆盖度:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s}$$

式中:FVC代表植被覆盖度;NDVI_s代表无植被覆盖像元的NDVI值;NDVI_v代表全植被覆盖像元的NDVI值。无植被覆盖和全植被覆盖像元的理论值应分别接近0与1,但由于大气情况、植被类型等因素的影响,两者并非定值。本文以0.5%置信度截取NDVI的上下阈值分别近似代表NDVI_v与NDVI_s,以此为基础进行FVC的计算,并参考李晶等^[17]的研究方法对计算结果进行分级:FVC≤10%的区域为低植被覆盖区域、10%<FVC≤35%,35%<FVC≤55%,55%<FVC≤75%、FVC>75%分别为中低、中、中高、高植被覆盖区域。

2.2.3 植被覆盖度的变化趋势分析 本文采用一元线性回归方法,逐像元对黄土高原地区20年间年植被覆盖度变化进行分析,计算公式如下:

$$\text{slope} = \frac{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})(FVC_i - \overline{FVC})}{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2}$$

式中:slope代表线性回归方程的斜率;n代表研究时间内包括的年数(本文的研究时间为2001—2020年,n=20);FVC_i代表第i年的FVC影像;FVC代表多年FVC均值合成影像。当slope>0时,表示植被覆盖度呈现增长趋势,反之说明呈现减少趋势。

采用F检验判断一元线性回归的趋势显著性,统计量计算公式为:

$$F = \frac{U}{Q/n-2}$$

式中:U代表回归平方和;Q代表误差平方和;n代表年数;U与Q的计算公式如下:

$$U = \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2, Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$$

式中:y_i代表第i年植被覆盖度的实际值;y_i代表第i年植被覆盖度的回归值;ȳ代表多年植被覆盖度的平均值。基于植被覆盖度的增减趋势与显著性检验结果,将植被覆盖度的变化情况分为以下5个等级:极显著减少(slope≤0, F>F_{0.99})、显著减少(slope≤0, F_{0.95}<F≤F_{0.99})、基本稳定(F≤F_{0.95})、显著增加(slope>0, F_{0.95}<F≤F_{0.99})、极显著增加(slope>0, F>F_{0.99})。

2.2.4 植被覆盖度的变异程度分析 变异系数(Coefficient of Variation, CV)是描述时间序列中数据变异程度的统计量,本文通过逐像元计算2001—2020年黄土高原地区植被覆盖度的变异系数来描述其变化的波动程度。变异系数的计算公式如下:

$$CV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (FVC_i - \overline{FVC})^2}{n-1}} / \overline{FVC}$$

式中:n代表研究年数;FVC_i代表第i年的FVC影

像; \overline{FVC} 代表多年 FVC 平均值。本文根据 CV 的大小将其依次分为 5 个等级^[18]:低波动变化($CV \leq 0.05$)、相对较低波动变化($0.05 < CV \leq 0.10$)、中等波动变化($0.10 < CV \leq 0.15$)、相对较高波动变化($0.15 < CV \leq 0.20$)和高波动变化($CV > 0.20$)。

2.2.5 植被覆盖度与气候因子的时滞偏相关分析
偏相关分析可以在消除其他变量影响的条件下,衡量某两个或多个变量之间的相关性。为量化降水与气温对植被覆盖度变化影响的滞后性,本文采用时滞偏相关分析法,在月尺度上计算植被覆盖度与平均气温、降水量在不同滞后时间下的偏相关系数。上述方法的基本流程为:计算全年植被覆盖度与前 0~k 月降水量(气温)之间的偏相关系数,经显著性检验后,分别将获取的两组偏相关系数进行最大值合成,并记录偏相关系数最大值对应的月份,用于分析研究区内植被覆盖度对降水变化的响应关系。植被覆盖度、降水和气温三者之间在不同时滞条件下相关系数的计算公式如下:

$$R_{FP} = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (P_i - \overline{P})(F_{i+k} - \overline{F})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (P_i - \overline{P})^2 \sum_{i=1}^{n-k} (F_{i+k} - \overline{F})^2}}$$

$$R_{FT} = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (T_i - \overline{T})(F_{i+k} - \overline{F})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (T_i - \overline{T})^2 \sum_{i=1}^{n-k} (F_{i+k} - \overline{F})^2}}$$

$$R_{PT} = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (T_i - \overline{T})(P_{i+k} - \overline{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (T_i - \overline{T})^2 \sum_{i=1}^{n-k} (P_{i+k} - \overline{P})^2}}$$

式中 R_{FP} 和 R_{FT} 分别代表不同时滞条件下植被覆盖度与降水量、气温之间的相关系数; R_{PT} 代表不同时滞条件下气温与降水量之间的相关系数; n 代表时间序列长度(本文研究时间段为全年, $n=12$); k 代表滞后时间; F_i 、 P_i 和 T_i 分别代表第 i 月的植被覆盖度、降水量和气温影像; \overline{F} 、 \overline{P} 和 \overline{T} 分别代表植被覆盖度、降水量和气温影像序列的均值。根据三者间的相关系数,进一步计算即可得到植被覆盖度与降水量、植被覆盖度与气温之间的偏相关系数,计算公式如下:

$$R_{FP-T} = \frac{R_{FP} - R_{FT} \cdot R_{PT}}{\sqrt{(1 - R_{FT}^2)(1 - R_{PT}^2)}}$$

$$R_{FT-P} = \frac{R_{FT} - R_{FP} \cdot R_{PT}}{\sqrt{(1 - R_{FP}^2)(1 - R_{PT}^2)}}$$

式中: R_{FP-T} 代表某一时滞条件下,消除了气温影响后植被覆盖度和降水量的偏相关系数; R_{FT-P} 代表某一时滞条件下,消除了降水量影响后植被覆盖度和气温的偏相关系数。采用 t 检验判断变量间偏相关系数

的显著性,检验统计量的计算公式如下:

$$t = \frac{R \sqrt{n-q-2}}{\sqrt{1-R^2}}$$

式中: R 代表偏相关系数; n 代表样本数; q 代表阶数。

已有研究表明^[19],植被覆盖度对降水和气温响应的滞后时间通常在 3 个月内,本文计算黄土高原地区全年植被覆盖度与前 0—3 月降水量(气温)的偏相关系数,以此为基础分析研究区植被覆盖度与降水量(气温)的相关性及滞后性。

3 结果与分析

3.1 黄土高原气候因子的时空分布特征

表 1 为不同地理分区年均气温和降水的平均值、变化率,图 2 为 2001—2020 年黄土高原地区平均气温和降水量的空间分布图,由表 1 和图 2A 可知,研究区多年平均降水 112~930 mm,在空间上呈现由东南向西北递减的趋势,东南土石山区、河谷平原区,及黄土高原沟壑区的部分地带降水量较高,在 600 mm 以上;西北沙地沙漠区和农灌区年均降水量则不足 400 mm。由表 1 和图 2B 可知,黄土高原多年平均气温介于 $-13^{\circ} \sim 16^{\circ} \text{C}$ 间,空间分布整体上呈现南高北低的趋势;各地理分区之中,海拔较低的河谷平原区平均气温最高,海拔较高的黄土高原沟壑区气温最低。根据表 1 中气温和降水的变化率可知,20 年间黄土高原整体及各地理分区的降水量与气温均呈现增长趋势,但变化趋势均不显著。

表 1 黄土高原不同地理分区多年气温和降水的平均值、变化率

Table 1 Average values and variation rates of annual temperature and precipitation in different geographical zones of the Loess Plateau

| 地理分区 | 降水量 | | 气温 | |
|---------|------------|------------------|--------------------------------|---|
| | 平均值/ mm | 变化率/ (mm/10a) | 平均值/ ($^{\circ}\text{C}$) | 变化率/ ($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) |
| 研究区整体 | 454.20 | 25.64 | 8.49 | 0.11 |
| 黄土高原沟壑区 | 498.00 | 27.68 | 7.10 | 0.06 |
| 农灌区 | 252.70 | 17.48 | 8.35 | 0.16 |
| 沙地和沙漠区 | 299.14 | 16.83 | 8.30 | 0.13 |
| 河谷平原区 | 601.75 | 25.08 | 12.06 | 0.05 |
| 黄土丘陵沟壑区 | 465.77 | 28.47 | 8.57 | 0.13 |
| 土石山区 | 506.53 | 29.95 | 9.05 | 0.18 |

注:*表示变化通过 0.05 显著性水平检验。

3.2 黄土高原植被覆盖度的空间分布

图 3 为 2001—2021 年黄土高原多年平均植被覆盖度的空间分布图。由图 3 可知,研究区植被覆盖度存在明显空间差异,除农灌区的部分区域外,整体上

呈现东南高、西北低,由低纬度向高纬度递减的趋势,这与黄土高原降水量的地带性有关:研究区降水量在空间上具有由东南向西北呈阶梯状递减的特点,降水量等值线沿东北—西南向延伸^[20]。黄土高原位于半湿润地区向半干旱地区过渡的地带,降水量是植被覆盖变化的主要驱动因子,在降水量等值线两侧的植被覆盖度存在显著差异。黄土高原高、中高植被覆盖区域主要分

布在研究区东南部,主要包括土石山区、河谷平原区和黄土高原沟壑区等年均降水量在 600 mm 以上的地区,面积占比分别为 24.51%,28.49%;中植被覆盖区域主要分布在研究区中部的过渡地带,该区域年均降水量在 400~600 mm 间,面积占比 22.52%;中低、低植被覆盖区域集中分布在年均降水量 400 mm 以下的农灌区与沙地沙漠区,面积占比分别为 21.15%,3.33%。

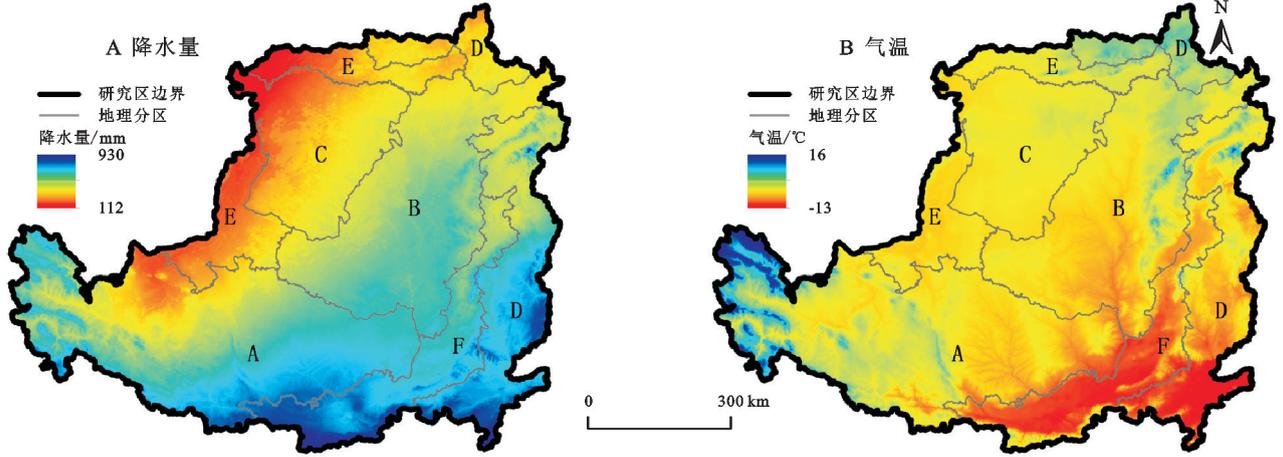


图 2 黄土高原多年平均气温和降水的空间分布

Fig. 2 Map of spatial distribution of average annual temperature and precipitation in the Loess Plateau

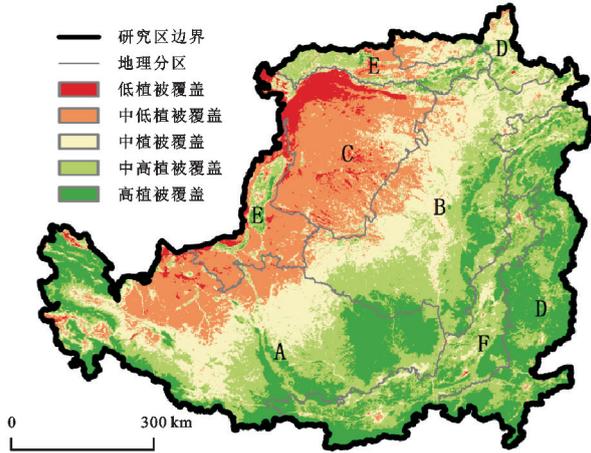


图 3 黄土高原多年平均植被覆盖度空间分布

Fig. 3 Map of spatial distribution of average vegetation coverage in the Loess Plateau over multiple years

3.3 黄土高原植被覆盖年际变化及空间差异

3.3.1 植被覆盖度的年际变化 2001—2020 年黄土高原及各地理分区的年植被覆盖度变化趋势如图 4 所示,结果表明:黄土高原地区整体的年植被覆盖度呈现显著增加趋势($p < 0.05$),增速约为 0.076/10 a,研究区植被覆盖度均值由 2001 年的 43.62% 上升至 2020 年的 62.83%,最低值为 2001 年的 43.62%,最高值为 2018 年的 63.56%。过去 20 年间各地理分区植被覆盖度均值介于 14.62%~79.14%,且全部呈现显著增加趋势($p < 0.05$),其中黄土丘陵沟壑区增速最快,为 0.11/10 a,植被覆盖度由 40.39% 上升至 65.72%;土石山区植被

覆盖度增速最慢,仅为 0.049/10 a,植被覆盖度由 59.57% 上升至 76.45%。

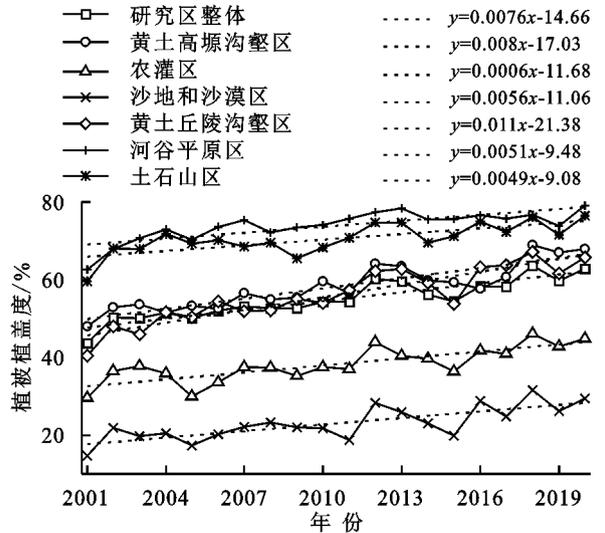


图 4 2001—2020 年黄土高原及各地理分区植被覆盖度年际变化曲线

Fig. 4 Inter annual variation curves of vegetation coverage in the Loess Plateau and its geographical zones from 2001 to 2020

3.3.2 植被覆盖度变化趋势的空间分布 图 5 为 2001—2020 年黄土高原地区植被覆盖度变化趋势和变异系数的空间分布图。由图 5A 可知,20 年间研究区内植被覆盖度呈现极显著增加趋势的区域面积为 38.62 万 km^2 ,占研究区总面积的 59.53%;植被覆盖度显著增加的区域面积为 7.84 万 km^2 ,占研究区总

面积的 12.09%; 植被覆盖度无显著变化的区域 17.19 万 km², 面积占比 26.51%; 植被覆盖度呈现极显著减少与显著减少的区域面积为 1.22 万 km², 集中分布在研究区东南部的河谷平原区, 占比 1.87%。

由图 5B 可知: 黄土高原不同地区的植被覆盖度变异系数存在明显差异, 变异系数较小的区域集中在研究区东南部, 较大的区域则集中在研究区西北部; 植被覆盖度变化呈高波动 ($CV > 0.2$) 的区域约占研

究区总面积的 38.29%, 植被覆盖度等级以中、中低、低为主; 变化波动相对较高 ($0.15 < CV \leq 0.2$) 和变化波动适中 ($0.1 < CV \leq 0.15$) 两类区域的面积占比分别为 16.88%, 16.52%, 两者的植被覆盖度等级均以中、中高为主; 波动相对较低 ($0.05 < CV \leq 0.1$) 的区域面积占比为 16.77%, 植被覆盖度等级以中高、高为主; 变化波动小 ($CV \leq 0.05$) 的区域面积占比 11.54%, 植被覆盖等级以高为主。

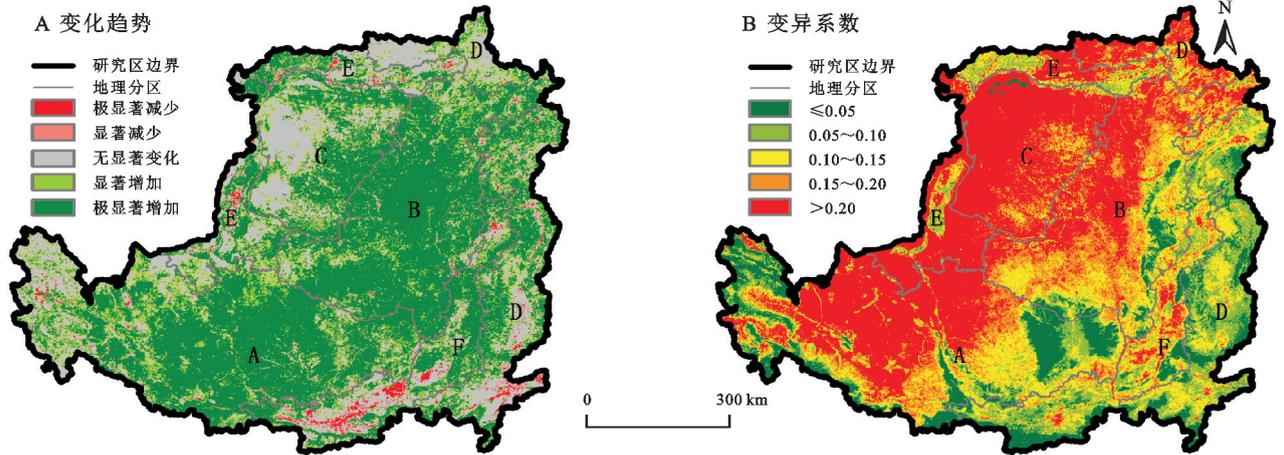


图 5 黄土高原植被覆盖度变化趋势和变异系数

Fig. 5 Trend of vegetation coverage change and coefficient of variation in the Loess Plateau

综上可知, 2001—2020 年黄土高原与各地理分区的年际植被覆盖均呈现显著增加趋势, 其中黄土丘陵沟壑区的增速最快, 土石山区的增速最慢; 在空间分布上, 植被覆盖显著增加区域面积远大于减少区域, 研究区中部黄土丘陵沟壑区与黄土高原沟壑区的增加趋势较为明显, 而植被覆盖减少地区主要集中在东南土石山区与河谷平原区。这与已有黄土高原植被变化的研究结果一致^[21], 表明我国开展的退耕还林(草)等一系列生态建设工程取得了显著成效, 研究区生态环境整体上有了明显改善; 研究区东南部地区人口密集, 随着经济增长与城镇化发展, 该地区的植被覆盖度出现减少趋势。此外, 本文关于植被覆盖变异程度的研究表明, 黄土高原西北部地区植被覆盖的变异程度较高, 植被覆盖度的变化趋势波动较大,

植被能否维持现有状况仍存在不确定性。为巩固生态恢复工程成果, 协调植被建设与环境状况, 实现黄土高原从“增绿”到“稳绿”的跨越^[22], 需要进一步分析各类型因素与研究区植被覆盖变化的关系, 加强生态工程建设, 提高黄土高原生态环境在气候变化与人类活动等因素影响下的稳定性。

3.4 黄土高原植被覆盖度与气候因子的时滞偏相关分析

3.4.1 降水与植被覆盖度的时滞偏相关性 降水和植被覆盖度的偏相关分析结果(图 6A)表明, 从空间

分布的角度而言, 黄土高原大部分地区的植被覆盖度和降水呈现高度正相关, 最大偏相关系数介于 0.6 与 1 之间; 仅 1.71% 区域植被覆盖度和降水间的偏相关系数未通过显著性检验。从滞后时间(图 6B)的角度而言, 除沙地和沙漠区有极小部分地区不存在滞后、河谷平原区和东南土石山区部分地区滞后时间为 1~2 个月外, 约占研究区总面积 95.87% 的区域滞后时间为 3 个月。

3.4.2 气温与植被覆盖度的时滞偏相关性 气温和植被覆盖度的偏相关分析结果(图 7A)表明, 占研究区总面积 57.68% 的区域植被覆盖度和气温呈高度正相关, 偏相关系数介于 0.6~1 之间, 主要分布在东南部地区; 约占黄土高原 42.32% 的地区植被覆盖度和气温间相关性并不显著, 主要分布在研究区西北部地区, 东南土石山区和河谷平原区的部分区域。图 7B 滞后时间的结果表明, 植被覆盖度对气温变化响应的滞后时间在空间分布上存在明显差异, 研究区东南部的滞后时间较短为 0~1 个月, 而西北部地区的滞后时间较长, 以 2~3 个月为主。

综上可知, 黄土高原研究区降水和气温与植被覆盖度的相关关系均以显著正相关为主, 其中降水与植被覆盖度呈显著正相关的区域面积更大, 相关程度更高, 说明黄土高原地区植被生长与降水的关系更为密切。降水与气温是驱动植被覆盖变化的重要因素; 降

水可以增加土壤湿度,为植被的生长提供水分;气温代表到达植被的太阳辐射能强度,为植被的生长提供能量^[23]。研究区植被覆盖度与气温、降水均以呈高度正相关的区域为主。除上述与气温降水均显著相关的区域外,研究区西北部多数地区植被覆盖与气温

的相关程度较低,这可能是由于该地区降水较少,气温升高会促进植被的蒸腾作用,导致土壤湿度降低,进而影响植被的生长。此外,由于人为灌溉和收割作物的影响,研究区水田和旱地区域植被覆盖度与降水、气温的相关程度均较低。

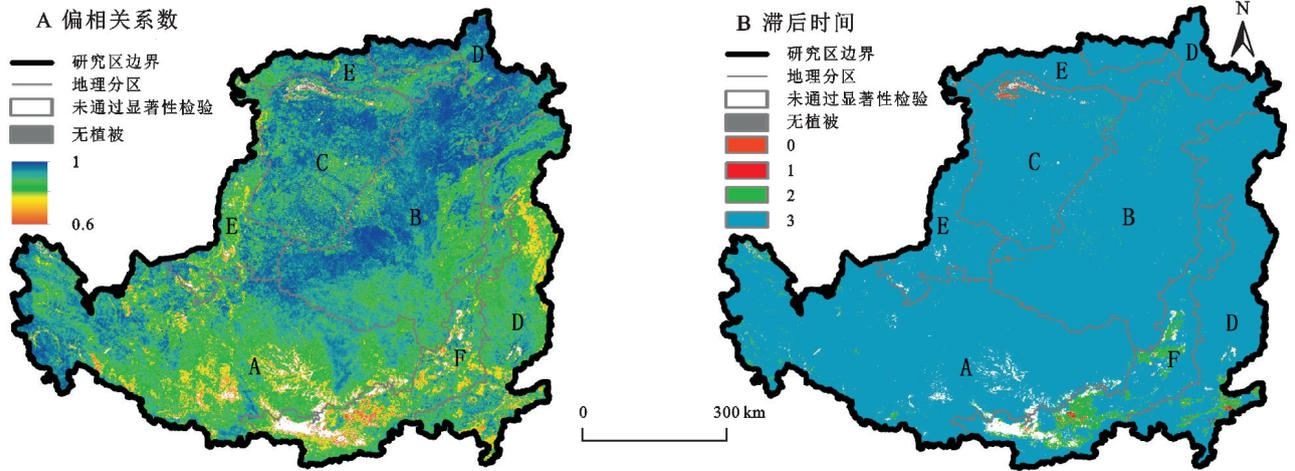


图 6 黄土高原月植被覆盖度与降水量的最大偏相关系数及对应滞后时间

Fig. 6 Maximum lagged correlation coefficient and time lags between monthly vegetation coverage with precipitation in the Loess Plateau

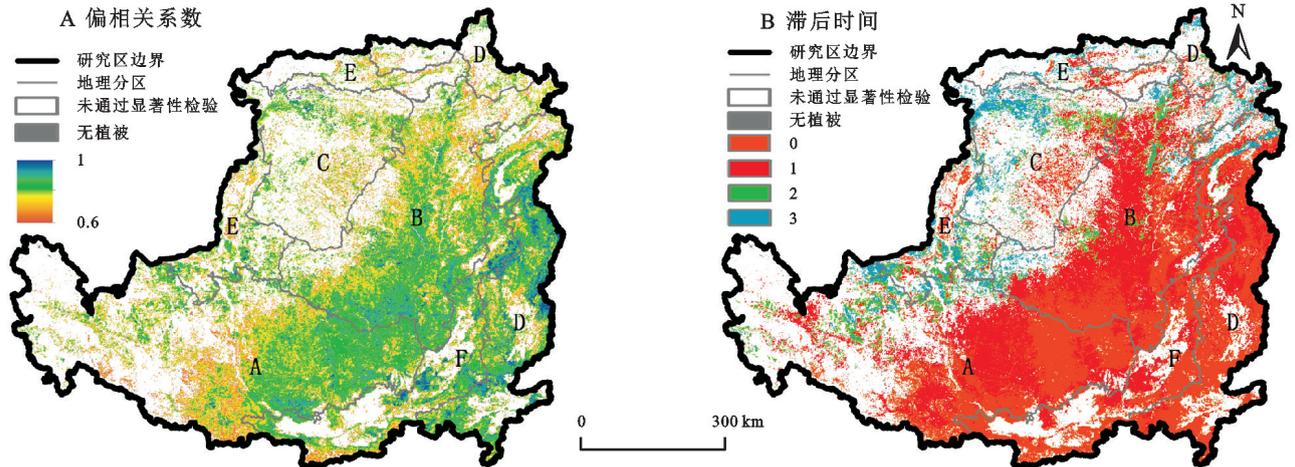


图 7 黄土高原月植被覆盖度与气温的最大偏相关系数及对应滞后时间

Fig. 7 Maximum lagged correlation coefficient and time lags between monthly vegetation coverage with temperature in the Loess Plateau

另一方面,研究区植被覆盖度对气温变化响应的滞后时间在 1 个月以内,对降水变化响应的滞后时间接近 3 个月,这与解晗^[24]和 Sun^[25]等的研究成果高度一致。降水滞后时间的空间分布差异较小,绝大多数地区植被对降水的滞后时间为 3 个月,仅研究区东南部及沙地和沙漠区北部部分地区例外。其中东南部旱地植被对降水变化响应的滞后时间为 1~2 个月,该地区以一年两熟或两年三熟作物为主要植被类型,月植被覆盖度的变化趋势与其他地区不同,此差异是造成该地区时滞性不同的可能原因。沙地和沙

漠区北部与当月降水的相关程度较高,这是由于该地区植被覆盖度较低,只能保持降水在土壤表面,并且温度较高导致表层土壤水分易于蒸发,沙地和沙漠区的植被对降水的滞后效应较不明显。研究区气温滞后时间的空间分布差异较大,西北部植被对气温的滞后时间较长为 2~3 个月,东南部气温的滞后时间为 0~1 个月。研究区东南部降水充足且水分利用率高,植被对气温变化更为敏感,其中森林和灌木林植被对气温的响应多出现于当月,而该地区草原植被的滞后时间则更接近 1 个月。西北部地区温度较高,但

由于该区域温度和降水变化不同期^[26],适合植被生长的水热条件通常伴随着降水增加出现,故该地区植被对气温变化响应的滞后时间较长。

4 结论

(1) 黄土高原地区植被覆盖度存在明显空间差异,整体上呈现西北低、东南高,由低纬度向高纬度递减的变化趋势。20 年间黄土高原整体及各地理分区年际植被覆盖度均呈增加趋势。在空间上,黄土高原植被覆盖度呈增加趋势的区域面积占比 71.62%,远大于减少区域(1.87%)与无明显变化区域(26.51%),但研究区内约 38.29%的区域植被覆盖度变化波动较大,仍需继续开展生态保护与修复工作进行巩固。

(2) 黄土高原绝大多数地区植被和降水呈显著正相关,仅河谷平原区西部极少数区域与降水相关性不显著;而研究区植被与气温相关程度的空间差异较为明显,西北部草原和东南部旱地均有部分区域与气温相关性不显著。另一方面,黄土高原多数地区植被对降水的响应存在 3 个月的滞后,而对气温变化响应的时滞性则较不明显,多数地区滞后时间在 1 个月内。

(3) 黄土高原地区植被变化受人为活动影响较大,后续应进一步分析相关因素造成的影响;此外,本文分析了植被覆盖度在时间方面的变化特征,所使用的方法未涉及空间自相关分析,在未来的工作中应加入相关方法以进行更为全面的分析。

参考文献:

- [1] Chuai X W, Huang X J, Wang W J, et al. NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998—2007 in Inner Mongolia, China[J]. *International journal of climatology*, 2013, 33(7): 1696-1706.
- [2] 高思琦,董国涛,蒋晓辉,等.黄河源植被覆盖度变化及空间分布自然驱动力分析[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(3): 429-439.
Gao S Q, Dong G T, Jiang X H, et al. Analysis of vegetation coverage changes and natural driving forces of spatial distribution in the source region of the Yellow River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(3): 429-439.
- [3] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等.1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331-5342.
Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in China during 1982—2012[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [4] Xin Z B, Xu J X, Zheng W. 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.
- [5] 甘春英,王兮之,李保生,等.连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J]. *地理科学*, 2011, 31(8): 1019-1024.
Gan C Y, Wang X Z, Li B S, et al. Changes of vegetation coverage during recent 18 years in Liang Jiang river watershed[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 1019-1024.
- [6] 聂桐,董国涛,蒋晓辉,等.延安地区植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 340-346.
Nie T, Dong G T, Jiang X H, et al. Spatiotemporal variation and driving forces of vegetation coverage in Yan'an area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5): 340-346.
- [7] Sun W, Shao Q, Liu J, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China[J]. *Catena*, 2014, 121: 151-163.
- [8] 刘斌,罗全华,常文哲,等.不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(6): 68-73.
Liu B, Luo Q H, Chang W Z, et al. Relationship between percentage of vegetative cover and soil erosion[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(6): 68-73.
- [9] 张家政,李崇贵,王涛.黄土高原植被覆盖时空变化及原因[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 224-230, 241.
Zhang J Z, Li C G, Wang. Dynamic changes of vegetation coverage on the Loess Plateau and its factors[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(1): 224-230, 241.
- [10] 王逸男,孔祥兵,赵春敬,等.2000—2020 年黄土高原植被覆盖度时空格局变化分析[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(03): 130-137.
Wang Y N, Kong X B, Zhao C J, et al. Change of vegetation coverage in the Loess Plateau from 2000 to 2020 and its spatiotemporal pattern analysis [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 130-137.
- [11] 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(中英文)*, 2021, 19(04): 60-68.
Li Y X, Zhu Q K, Shi R Y, et al. Spatial and temporal changes of vegetation cover and its influencing factors in the Loess Plateau from 2000 to 2018[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(4): 60-68.
- [12] Peng S, Ding Y, Liu W, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to

- 2017[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [13] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202:18-27.
- [14] Li J, Wang J, Zhang J, et al. Growing-season vegetation coverage patterns and driving factors in the China-Myanmar Economic Corridor based on Google Earth Engine and geographic detector[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136:108620.
- [15] Zhong Q, Ma J, Zhao B, et al. Assessing spatial-temporal dynamics of urban expansion, vegetation greenness and photosynthesis in megacity Shanghai, China during 2000—2016 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233:111374.
- [16] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. *资源科学*, 2004, 26(4): 153-159.
Li M M, Wu B F, Yan C Z, et al. Estimation of vegetation fraction in the Upper basin of miyun reservoir by remote sensing[J]. *Resources Science*, 2004, 26(4): 153-159.
- [17] 李晶, 闫星光, 闫萧萧, 等. 基于 GEE 云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1439-1450.
Li J, Yan X G, Yan X X, et al. Temporal and spatial variation characteristic of vegetation coverage in the Yellow River basin based on GEE cloud platform[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1439-1450.
- [18] 陈登魁, 马超, 王夏冰, 等. 1982—2015 年可可西里 NDVI 变化特征及其气候响应[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1410-1417.
Chen D K, Ma C, Wang X B, et al. Variation of NDVI and its response to climate change in Hoh Xil during the period of 1982—2015 [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(6): 1410-1417.
- [19] 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.
Tian Y C, Liang M Z. The NDVI characteristics of begetation and its ten-day response to temperature and precipitation in Beibu gulf coastal region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(3): 488-502.
- [20] 肖蓓, 崔步礼, 李东昇, 等. 黄土高原不同气候区降水时空变化特征[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(1): 51-61.
Xiao B, Cui B L, Li D S, et al. Temporal and spatial variations of precipitation in different climatic regions of the Loess Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(1): 51-61.
- [21] 张耀文, 张勃, 姚荣鹏, 等. 2000—2020 年渭河流域植被覆盖度及产水量时空变化[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(2): 223-233.
Zhang Y W, Zhang B, Yao R P, et al. Temporal and spatial changes of vegetation coverage and water production in the Weihe River Basin from 2000 to 2020 [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(2): 223-233.
- [22] 金钊. 黄土高原小流域退耕还林还草的生态水文效应与可持续性[J]. *地球环境学报*, 2022, 13(02): 121-131.
Jin Z. Ecohydrological effects and sustainability of the grain for green project on the Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Earth Environment*, 2022, 13(2): 121-131.
- [23] 徐兴奎, 林朝晖, 薛峰, 等. 气象因子与地表植被生长相关性分析[J]. *生态学报*, 2003, 23(2): 221-230.
Xu X K, Lin C H, Xue F, et al. Correlation analysis between meteorological factors and the ratio of vegetation cover [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 221-230.
- [24] 解晗, 同小娟, 李俊, 等. 2000—2018 年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(11): 4536-4549.
Xie H, Tong X J, Li J, et al. Changes of NDVI and EVI and their responses to climatic variables in the Yellow River Basin during the growing season of 2000—2018 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(11): 4536-4549.
- [25] Sun G, Guo B, Zang W, et al. Spatial-temporal change patterns of vegetation coverage in China and its driving mechanisms over the past 20 years based on the concept of geographic division [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, 11(1): 2263-2281.
- [26] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 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.
Mu S J, Li J L, Chen Y Z, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001—2010 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1255-1268.