

退耕还林草 20 年来榆林市植被覆盖度 时空变化及影响因素分析

刘逸滨^{1,2}, 刘宝元^{1,3}, 成城⁴, 张加琮^{1,3}, 陆绍娟⁵

(1.中国科学院水利部水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点室,陕西 杨凌 712100;
2.中国科学院大学,北京 100049;3.西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点室,
陕西 杨凌 712100;4.西北农林科技大学,陕西 杨凌 712100;5.云南大学国际河流与生态安全研究院,昆明 650091)

摘要: 为了解退耕还林草工程实施 20 年来黄土高原生态脆弱区生态环境的变化及其主要驱动力,选取榆林市作为黄土高原生态环境脆弱区的代表,基于像元二分模型估算榆林市 2001—2020 年的植被覆盖度,利用一元线性回归法分析其 20 年来植被覆盖度的时空变化特征,并结合偏相关分析和地理探测器法筛选退耕还林草不同时期影响榆林市植被覆盖度年际变化和空间分异的主导因素。结果表明:(1)2001—2020 年榆林市植被覆盖度随时间序列呈显著增加趋势($S=0.011, p<0.01$)。建设期(2001—2010 年)榆林市整体植被覆盖度显著增加($S=0.013, p<0.01$),而巩固期(2011—2020 年)增加趋势不显著($S=0.005, p>0.05$)。 (2)2001—2020 年榆林市植被覆盖度空间分布呈由东向西递减的格局,榆林市各县(区)植被覆盖度总体呈现增长趋势,其中榆林市东部地区增长趋势较为显著。建设期榆林市植被覆盖度呈增加趋势的面积占比(82.1%)多于巩固期(58.0%)。 (3)2001—2020 年影响植被覆盖度年际变化的主导因素为累积退耕还林草面积和降雨量,累积退耕还林草面积和降雨量分别是建设期和巩固期的首要影响因素。 (4)2001—2020 年影响榆林市植被覆盖度空间分异的主导因素为土壤质地、降雨量和土地利用方式。在建设期和巩固期土壤质地的空间差异都与植被覆盖度空间分异密切相关。植被分布的空间异质性和主要影响因素之间的交互作用可为生态恢复措施的精准实施提供科学依据。

关键词: 退耕还林草工程; 植被覆盖度; 地理探测器; 年际变化; 空间分异; 土地利用

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)02-0197-12

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.02.026

Spatio-temporal Changes and Influencing Factors of Vegetation Coverage in Yulin City During the Past 20 Years Since the Implementation of the “Grain for Green” Program

LIU Yibin^{1,2}, LIU Baoyuan^{1,3}, CHENG Cheng⁴, ZHANG Jiaqiong^{1,3}, LU Shaojuan⁵

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of
Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,
Yangling, Shaanxi 712100; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3.State Key
Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 4.Northwest A&F University, Yangling,
Shaanxi 712100; 5.Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091)

Abstract: To understand changes in the ecological environment and its main driving forces in the ecologically fragile areas of the Loess Plateau in the past 20 years since the implementation of the “Grain for Green” Program, taking Yulin City as a typical example of the fragile ecological environment on the Loess Plateau, The vegetation coverage of Yulin City from 2001 to 2020 was estimated based on the pixel dichotomy model. This study analyzed the spatial and temporal variations of the vegetation coverage in Yulin City during the past 20 years by using univariate linear regression methods. The dominant factors affecting the interannual

收稿日期:2021-09-20

资助项目:国家自然科学基金重点项目(41830758)

第一作者:刘逸滨(1997—),女,博士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:liuyibin19@mailsucas.ac.cn

通信作者:刘宝元(1958—),男,博士,教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:Baoyuan@bnu.edu.cn

changes and spatial distribution of vegetation coverage were analyzed by using the partial correlation analysis and geographic detector methods during the different periods of “Grain for Green” Program. The results showed that: (1) The vegetation coverage in Yulin City significantly increased with time series ($S=0.011$, $p<0.01$) from 2001 to 2020. The vegetation coverage during the construction period (2001—2010) increased significantly ($S=0.013$, $p<0.01$), while its increasing trend in the consolidation period (2011—2020) was not significant ($S=0.005$, $p>0.05$). (2) The spatial distribution of vegetation coverage in Yulin City decreased from east to west from 2001 to 2020. The vegetation coverage of all counties (districts) in Yulin City showed an overall increasing trend, among which the eastern part of Yulin City had a more significant growth trend. However, the proportion of area with increasing vegetation coverage in Yulin City in the construction period (82.1%) was larger than that in the consolidation period (58.0%). (3) From 2001 to 2020, the dominant factors affecting inter annual change of vegetation coverage were the cumulative area of the Grain for Green Program and rainfall. The cumulative area of the Grain for Green Program was the primary factor in the construction periods, while rainfall was the primary factor in the consolidation period. (4) Soil texture, rainfall and land use type mainly affected the spatial distribution of vegetation coverage from 2001 to 2020. During construction and consolidation periods, the spatial differences of soil texture were closely related to spatial stratified heterogeneity in the vegetation coverage. The spatial heterogeneity of vegetation distribution and the interaction between the main influencing factors could provide a scientific basis for the precise implementation of ecological restoration measures.

Keywords: Grain for Green Program; fractional vegetation coverage; geographic detector; inter annual variation; spatial stratified heterogeneity; land use type

植被覆盖度 (fractional vegetation coverage, FVC) 指观测区内的植被垂直投影面积占观测区总面积的百分比, 用以表征植物群落在地表覆盖的状况^[1]。同时, 植被覆盖也是影响土壤侵蚀、维持生态环境良好发展的关键因素^[2]。目前国内外已有较多学者在不同地区开展了植被覆盖度的相关研究, 主要包括植被覆盖度的提取与估算^[3]、区域植被覆盖度的监测与动态变化分析^[4]、植被覆盖度变化的驱动因素^[5]、植被覆盖度与生态环境^[6]、气候变化^[7]、水土保持^[8]间的关系等方面。对于植被覆盖度的获取, 通常采用地表实测法和遥感测量法。由于植被覆盖度的空间分异性, 地表实测法具有明显的尺度局限性, 难以在大尺度范围展开测量, 而遥感法则能高效地获得大尺度范围内精度较高的连续数据^[9]。遥感法包括基于植被指数的估算方法及基于数据挖掘技术的估算方法。其中, 基于植被指数的估算方法相对于其他方法来说操作简单且效率较高, 无条件限制, 更具有普遍意义^[10]。程红芳等^[11]将包括经验模型法、像元模型法在内的几种基于植被指数的植被覆盖度遥感估算方法进行了比较表明, 基于植被指数的像元分解模型法对实测数据没有依赖性, 可广泛应用, 是今后地面统计测量的发展方向。

植被覆盖度及其变化除可以直接反映某区域内生态环境的变化之外, 还可对区域内的气候、水文、生

态等方面起到指示作用^[12]。目前, 针对植被覆盖度时空变化的研究方法主要包括: 遥感影像法^[13]、一元线性回归趋势线法、Hurst 指数法^[14]等方法, 大多数研究基于以上方法对估算出的植被覆盖度在时间序列及空间分布的变化进行了分析。此外, 由于植被覆盖度通常受自然、人类活动等多方面因素的影响, 对各因素影响程度的定量分析可为生态环境治理提供有力依据。然而, 前人对于植被覆盖度时空变化影响因素的研究主要运用多元线性回归分析、相关性分析^[15]等传统数学统计方法。以上方法未将各因素对植被覆盖度在时间尺度上年际变化的影响与空间尺度上分布变化的影响区分开, 均假设植被覆盖度在时间和空间上与各影响因素之间存在显著的线性关系, 然而在空间上此类严格的线性关系可能并不存在, 需结合空间分异性原理解释空间分布变化的驱动力。地理探测器方法是近年来提出的一种揭示事物背后驱动力的新统计学方法^[16], 该方法不以线性假设为前提, 也无需考虑变量之间的共线性, 其核心思想是以空间分异性为理论基础, 利用层内和层间的方差判断自变量对因变量的相对贡献以及变量之间的相互关系。目前已用于疾病因子评估^[17]、社会经济^[18]、生态环境^[19]、气象^[20]、土壤侵蚀^[21]等众多研究领域, 该方法也已用于分析我国不同地区的植被覆盖度空间变化驱动力^[22-23]。

榆林市位于黄土高原中北部,是黄土高原生态环境最为脆弱的地区之一。由于气候条件恶劣,且土质较为疏松,在降雨频繁的夏季易发生水力侵蚀,在多风少雨的冬、春季则易发生风力侵蚀,土壤侵蚀与水土流失问题较为严重。自 1999 年起黄河中上游地区开始大规模实施退耕还林草为主的生态建设和保护工程,植被覆盖度逐渐增加,水土流失面积逐年减少,明显改善了黄土高原生态脆弱区生态环境^[24]。尽管已有学者^[25-26]研究了该地区植被覆盖度变化及其驱动因素,然而对于退耕还林草工程实施以来不同时期植被覆盖度分别在时间变化和空间分异上受到自然因素或人为因素的影响程度尚不清楚。本文在像元二分法模型计算榆林市 2001—2020 年植被覆盖度的基础上,利用一元线性回归法对退耕还林草工程期间榆林市植被覆盖度的时空变化趋势进行了分析,并基于偏相关分析法和地理探测器方法,分别建立因素体系,对榆林市植被覆盖度时间变化及空间分异的主导因素进行了探究。研究还着重对比分析了退耕还林草工程不同阶段植被覆盖度的变化及其影响因素的差异,其结果对榆林市退耕还林草工程的成效评价具有重要意义,也可为生态脆弱区域生态环境保护、资源可持续利用及相关决策提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

榆林市(107°28'E—111°15'E,36°57'N—39°34'N)地处毛乌素沙漠和黄土高原的交界处,位于陕西省最北部(图 1),总土地面积为 43 578 km²,占陕西省土地总面积的 21.2%。境内地形呈西北高东南低的态势,北部为风沙草滩区,东南部为黄土高原丘陵沟壑区,西南部为梁状低山丘陵区。榆林市气候属于暖温带和温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温约 10℃,年平均降水量 400 mm 左右,年内分布极不均匀,主要集中在 7、8 月。主要土壤类型为风砂土、绵砂土、黄绵土等。疏松的土质导致该地区在降雨频繁的夏季容易发生土壤水力侵蚀,而在多风少雨的冬、春季极易发生风力侵蚀。

1.2 数据来源与预处理

本文共收集与研究密切相关的 6 种基础数据。包括用于计算植被覆盖度的 NDVI 数据,用于提取高度、坡度等地形数据的 DEM 数据,用于分析植被覆盖度影响因素的气象站点实测数据、土壤质地数据、土地利用数据及累积退耕还林草面积数据(表 1)。

1.3 植被覆盖度计算

基于植被指数采用像元二分模型计算植被覆盖

度。该方法的原理是通过假设每个 NDVI 像元由纯植被和纯裸土两部分组成,每个像元中有植被覆盖的面积占比即为该像元的植被覆盖度^[27](公式(1))。选用 2001—2020 年植被生长季(4—9 月)的 NDVI 影像,采用最大值合成法(maximum value composite, MVC)消除云层、大气等外界因素对遥感数据的干扰后^[28],得到各年 NDVI 值。

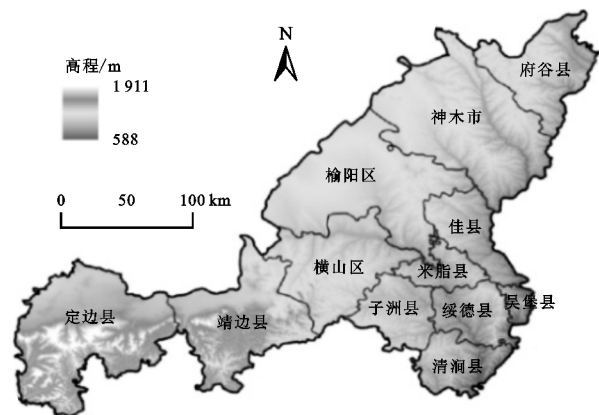


图 1 榆林市概况

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

式中:FVC 为植被覆盖度;NDVI 为混合像元的植被指数值;NDVI_{veg} 为纯植被土壤像元的植被指数值;NDVI_{soil} 为纯裸土土壤像元的植被指数值。

根据 MODIS 影像数据上 NDVI 的灰度分布,计算 NDVI 累积频率分布曲线,选取累积频率 0.5% 和 99.5% 处的 NDVI 值分别表示纯裸土 NDVI_{soil} 和纯植被 NDVI_{veg}^[29]。

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (2)$$

式中:FVC 为植被覆盖度;NDVI_{min} 为 NDVI 最小值;NDVI_{max} 为 NDVI 最大值。

1.4 植被覆盖度变化趋势分析

采用一元线性回归方法反映榆林市年植被覆盖度随时间的变化趋势及其在空间(像元尺度)上的差异。将植被覆盖度及时间序列进行回归分析,利用计算得到一元线性回归系数 S 来表示变化趋势,S>0 表示植被覆盖度呈增加趋势;S<0 表示植被覆盖度呈减少趋势。

$$S = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times FVC_i - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n NDVI_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中:S 为年均植被覆盖度与时间序列回归系数,即拟合趋势斜率;n 为年份序列;FVC_i 为第 i 年的植被覆盖度。利用 F 检验对变化趋势 S 进行显著性检验,当 S 值通过 p<0.05 的显著检验,认为增加

(降低)趋势显著,当 S 值通过 $p<0.01$ 的显著检验,则认为其增加(降低)趋势极显著。将结果分为不显著降低($S<0, p>0.05$)、显著降低($S<0, p<0.05$)、极显著降低($S<0, p<0.01$)、不显著增加($S>0, p>0.05$)、显著增加($S>0, p<0.05$)、极显著增加($S>0, p<0.01$)6 类。

表 1 基础数据信息及预处理

数据类型	数据来源	产品	分辨率(时间范围)	预处理
NDVI	美国国家航空航天局(NASA)	中分辨率成像光谱仪 MODIS 中的陆地专题产品数据 MOD13Q1	250 m(2001—2020 年)	MRT、ENVI5.3、ArcGis10.2 等软件对 MODIS 数据进行辐射定标、格式转换和裁剪,重采样为 1 km 分辨率
高程、坡度	地理空间数据云网站(http://www.gscloud.cn/)	数字高程模型(digital elevation model, DEM)	90 m	ENVI 软件进行拼接、裁剪和格式转换,重采样为 1 km 分辨率
气象数据	国家气象科学数据共享服务平台(http://data.cma.cn/site/index.html)	中国地面气候资料日值数据集:降水量、气温、相对湿度	研究区及周边的 16 个气象台站(2001—2020 年)	AUNSPIN 软件对气象数据进行以 DEM 为协变量的空间插值,得到 1 km 分辨率的栅格图像
土壤质地	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)	中国土壤质地空间分布数据集	1 km	—
土地利用	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)	中国土地利用遥感监测数据集	1 km(2005 年、2010 年、2015 年、2020 年)	—
累积退耕还林草面积	榆林市退耕还林办	退耕还林草面积、荒山造林面积	2001—2020 年	—

1.5 植被覆盖度影响因素分析

1.5.1 植被覆盖度时间变化的因素分析 采用偏相关分析法对影响植被覆盖度年际变化的因素进行分析,偏相关系数指在对其他变量的影响进行控制的条件下,衡量多个变量中某 2 个变量之间的线性相关程度的指标^[30],并利用 p 值检验其显著性,计算公式为:

$$R_{xy \cdot z} = \frac{R_{xy} - R_{xz} \cdot R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)(1 - R_{yz}^2)}} \quad (4)$$

式中: $R_{xy \cdot z}$ 为剔除 Z 的影响之后, Y 与 X 之间的偏相关程度的度量; R_{xy} 、 R_{xz} 、 R_{yz} 分别是 X 、 Y 、 Z 两两之间的相关系数。选取各年 4—7 月累积降雨量、平均气温、平均相对湿度作为自然因素,累积退耕还林草面积(包括退耕面积和荒山造林面积)代表人为因素(图 2),利用偏相关分析榆林市植被覆盖度年际变化的主导因素。

1.5.2 植被覆盖度空间分异性分析 采用地理探测器方法的因子探测器和交互探测器分析植被覆盖度空间分异性的影响因素及因子间的交互效应。其中,因子探测器可用于探测属性 Y (因变量)的空间分异性,以及因素 X (自变量)对属性 Y 空间分异的解释力^[16],其计算方法为:

$$q_{f, FVC} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (5)$$

$$SSW = \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2, SST = N \sigma^2 \quad (6)$$

式(5)中: $q_{f, FVC}$ 表示各影响因素 f (factor)对植被覆盖度(FVC)的解释力,值域为 $[0, 1]$ 。 $q_{f, FVC}$ 越接近于

1 则说明各影响因素对植被覆盖度的可解释程度越强。 N 和 σ^2 分别表示研究区样本总数和区域植被覆盖度的方差。 N_i 和 σ_i^2 分别表示影响因素 f 中 i 类的样本数和区域植被覆盖度的方差。 i 是各影响因素 f 的分类(层)数目。 L 是各影响因素的分类(层)总数。

式(6)中 SSW 和 SST 分别为层内方差之和(within sum of squares)和全区总方差(total sum of squares)。SSW 与 SST 之比越小,植被覆盖度的空间分异性越显著。

交互探测器用以识别不同影响因素 X (自变量)之间的交互作用。在本研究中,用交互探测器评估影响因素 X_1 和 X_2 之间的共同作用对植被覆盖度空间分异的解释力。依据交互作用结果的差异,一般可将交互作用分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强 5 种,交互效果依次递增。

依据前人^[31-32]的研究成果,本文选取与植被覆盖度相关性较密切的气象因素(年平均降雨量、年平均气温、年平均相对湿度)、地理因素(坡度、高程、土壤质地)和人为因素(土地利用类型)3 类 7 个因素作为自变量(X)(图 2),年均植被覆盖度作为因变量(Y),利用地理探测器对榆林市植被覆盖度空间分异的主导因素进行分析。对上述数据结合实际情况,依据地理探测器的要求,参照王劲峰等^[16]提出的数据离散化方法,将输入的自变量(X)数据转换为“类”(分级)数据,即土地利用方式数据和土壤质地数据按照原始类别进行分类;降雨量数据按照 15 mm 间隔分成 6 类;坡度按照 $<10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 40^\circ$ 、 $40^\circ \sim 50^\circ$ 、 $>50^\circ$ 分为 6 类;其余变量均按自然断点法

分为 9 类^[33]。利用 ArcGIS 10.2 软件在榆林市区划范围内建立 1.5 km×1.5 km 的渔网方格,最终共划分 19 153 个研究单元,并在每个研究单元中心设置样本点,将植被覆盖度及各影响因子分类值赋予于创建的样本点位,导入到地理探测器中运行,计算各因子对于植被覆盖度空间分异的解释力 q 值。

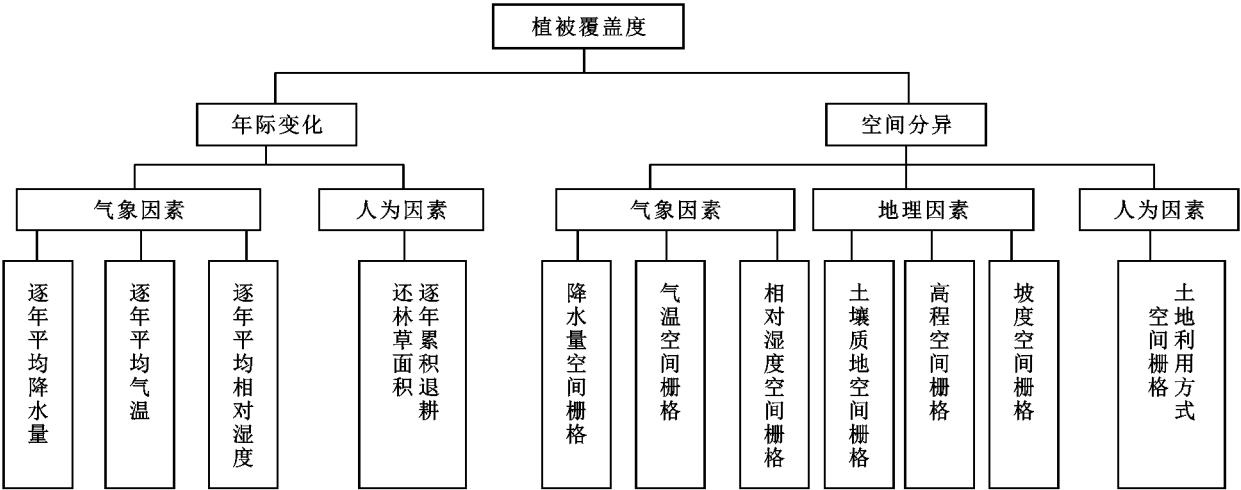


图 2 植被覆盖度年际变化和空间分异影响因素

2 结果与分析

2.1 退耕还林草背景下植被覆盖度的时空变化特征

2.1.1 植被覆盖度的时间变化特征 通过趋势分析及 F 检验对 2001—2020 年榆林市植被覆盖度随时间变化趋势的分析发现,2001—2020 年榆林市及各县区植被覆盖度均呈极显著增加趋势($S=0.011$, $p<0.01$)(图 3a、表 2)。利用分段线性回归(PLR)误差方差最小($p<0.05$)时间节点的检验发现,研究区域的植被覆盖度以 2011 年为节点,划分为 2001—2010 年和 2011—2020 年两阶段时方差最小,进而将退耕还林草工程实施过程划分为建设期(2001—2010 年)和巩固期(2011—2020 年)2 个阶段。结果表明,在建设期,榆林市整体植被覆盖度极显著增加($S=0.013$, $p<0.01$),各县(区)中除定边县、横山区外,其余县(区)植被覆盖度均呈显著上升趋势($p<0.05$)。在巩固期,榆林市整体植被覆盖度增加趋势不显著($S=0.005$, $p>0.05$),各县(区)中府谷市、神木市、榆阳区呈不显著增加趋势,清涧县、子洲县呈显著下降趋势($p<0.05$),其余县(区)植被覆盖度变化均呈不显著下降趋势(图 3b~3m、表 2)。

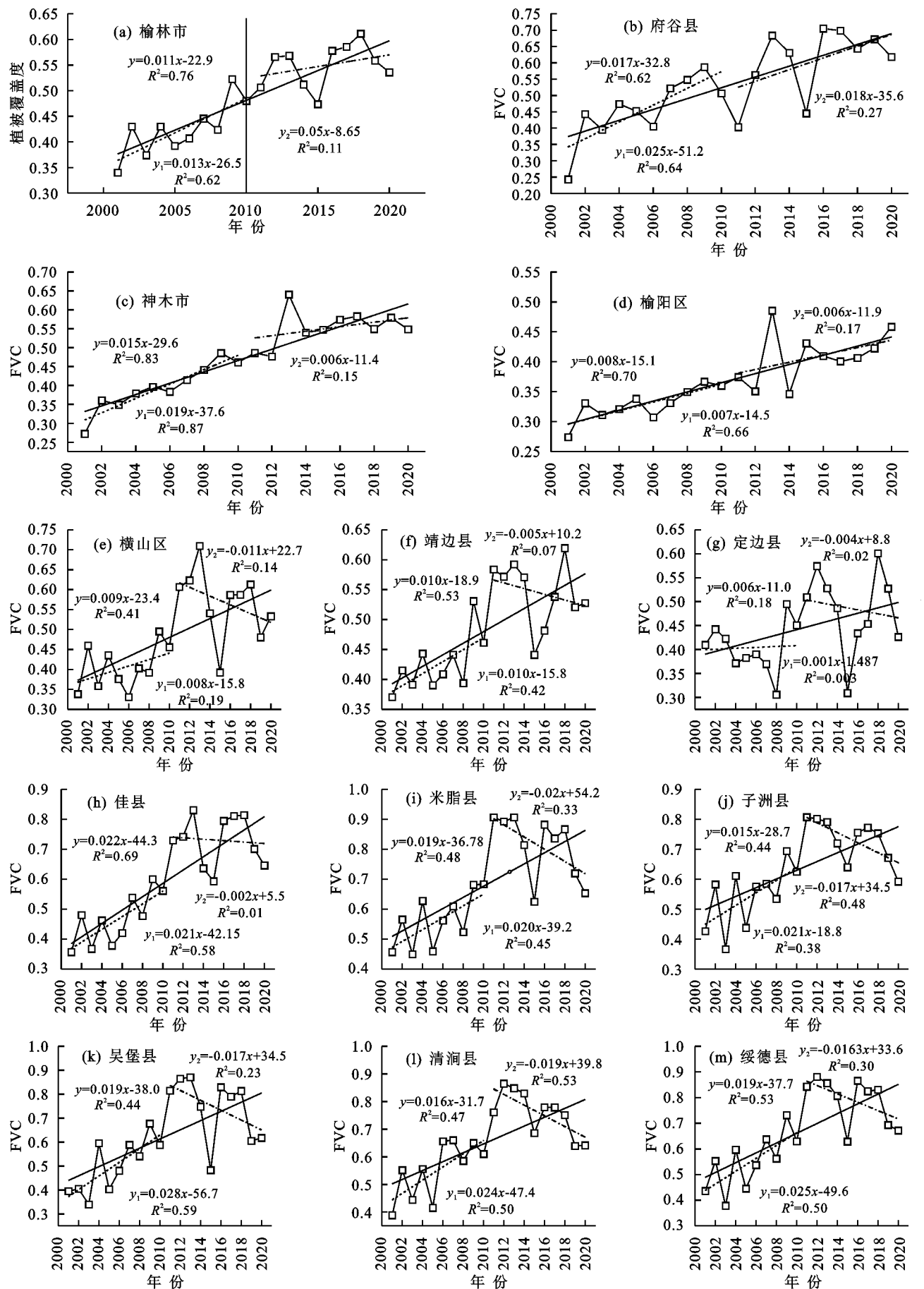
2.1.2 植被覆盖度空间分布及趋势特征 榆林市植被覆盖度空间分布呈由东向西递减的格局(图 4),东西差异较大。低值区主要分布于榆阳区、神木市、横山区、靖边县、定边县。高值区主要分布于东南部黄土高原丘陵沟壑区,这与该区域是退耕还林草的重点建设区域密切相关。

2001—2020 年榆林市植被覆盖度在空间上以增加趋势为主(图 5c),呈增加趋势的面积占全区面积的 84.5%,其中呈显著和极显著增加的区域分别占总面积的 47.3%和 10.5%,主要分布于府谷县、神木市

及东南部黄土高原丘陵沟壑区域(佳县、米脂县、绥德县、吴堡县、清涧县、子洲县);呈降低趋势的区域占总面积的 15.4%,其中显著降低和极显著降低面积分别占比 1.3%和 1.0%,主要分布在榆阳区、定边县、靖边县、神木县西部及城镇化发展速度较快的区域(图 5f)。植被覆盖度在建设期和巩固期均以不显著增加为主,分别占总面积的 47.9%和 43.8%(图 5a、图 5b)。在建设期,呈显著和极显著增加面积共占 34.2%,主要分布于神木县、府谷县和吴堡县,显著和极显著降低面积仅占 0.9%,离散分布于城乡建设区(图 5d);在巩固期,呈显著和极显著增加面积占 14.1%,主要分布于府谷县;呈不显著降低面积占比较大(35.8%),主要分布于榆林市中部和东南部(图 5e)。

2.2 退耕还林草背景下植被覆盖度影响因素分析

2.2.1 植被覆盖度年际变化的主导因素 通过植被覆盖度与各因子在时间序列上的偏相关分析及显著性检验分析的不同阶段植被覆盖度年际变化的主导因素结果显示,不同阶段影响植被覆盖度年际变化的主导因素不同。2001—2020 年,榆林市植被覆盖度年际变化与累积退耕还林草面积动态变化的关系表现为极显著相关($R=0.86$, $p<0.01$),与降雨量的动态变化表现为显著相关($R=0.59$, $p<0.05$),而与气温和相对湿度间的相关关系较弱,即人为因素导致的林地面积增多以及降雨量的动态变化是 20 年来植被覆盖度年际变化的主要原因。在建设期,植被覆盖度年际变化仅与累积退耕还林草面积动态变化表现为显著相关($R=0.71$, $p<0.05$),与其余因子均表现为不显著相关;在巩固期,植被覆盖度的年际变化与降雨量的动态变化趋势较为一致,表现为极显著相关($R=0.85$, $p<0.01$),而与其他因素间的关系则较弱(图 6,表 3)。



—□— 植被覆盖度 ——— 2001—2020年拟合趋势线(y) - - - - 2001—2010年拟合趋势线(y_1) ····· 2011—2020年拟合趋势线(y_2)

图 3 榆林市及各县(区)年平均植被覆盖度年际变化趋势

表 2 各县(区)年平均植被覆盖时间变化 趋势斜率及显著性检验						
市县(区)	2001—2010 年		2011—2020 年		2001—2020 年	
	斜率	<i>p</i> 值	斜率	<i>p</i> 值	斜率	<i>p</i> 值
榆林市	0.013	0	0.005	0.35	0.011	0
榆阳区	0.007	0	0.006	0.23	0.008	0
横山区	0.008	0.21	−0.011	0.28	0.009	0
神木市	0.019	0.00	0.006	0.28	0.015	0
府谷县	0.025	0.01	0.018	0.13	0.017	0
定边县	0.001	0.89	−0.004	0.68	0.006	0
靖边县	0.010	0.04	−0.005	0.45	0.010	0
佳县	0.021	0.01	−0.002	0.81	0.022	0
米脂县	0.020	0.03	−0.020	0.08	0.019	0
吴堡县	0.028	0.01	−0.021	0.16	0.008	0
子洲县	0.021	0.05	−0.017	0.03	0.015	0
清涧县	0.024	0.02	−0.019	0.02	0.016	0
绥德县	0.025	0.02	−0.016	0.10	0.019	0

2.2.2 植被覆盖度空间分异的主导因素 通过因子探测器对不同阶段植被覆盖度空间分异影响因素的发现,虽然各因子均显著影响植被覆盖度的空间变异($p<0.05$),但不同阶段各因子对于植被覆盖度空间分异的解释力有所差异(图 7)。退耕还林草的 20 年间,土壤质地对植被覆盖度空间分异的解释力最强($q=0.253$),土壤是植物生长的基础条件,土壤质地对植被覆盖度的分布起到决定性作用。气象因素中,降雨量($q=0.241$)占主导地位,其对植被覆盖度空间分异的影响力远高于温度和相对湿度,这与干旱半干旱地区植被对水分十分敏感,进而影响植被生长相关。而表征人为因素的土地利用方式($q=0.228$)对植被覆盖度空间分异的解释力仅次于降雨量和土壤质地。可见,以人为因素改变土地利用方式的退耕还林工程对榆林市植被覆盖度的改善也起到关键作用。在退耕还林草的建设期,人为作用将部分耕地转变为林地、草地,植被覆盖度显著增大,土地利用方式($q=0.231$)对于此阶段植被覆盖度空间分异的解释力最强,土壤质地($q=0.214$)次之,降雨量($q=0.138$)位于第 3。在巩固期,植被覆盖度整体得到明显提高且趋于稳定,但由于降雨地域分配不均,导致依赖水分生长的草地、林地层内植被覆盖度方差变大,因此土地利用方式对于植被覆盖度空间分异的解释力较建设期下降($q=0.203$),土壤质地($q=0.254$)在此阶段成为主导因素。

2.2.3 植被覆盖度空间分异影响因素的交互作用分析 交互探测器结果表明,因素对植被覆盖度的影响存在明显的交互效应。因子两两交互后对植被覆盖度的影响均为增强,表现为双因子增强和非线性增强,其中非线性增强效果大于双因子增强。不同阶段植被覆盖度的主导交互作用存在差异(表 4):2001—

2020 年,各因子两两交互后均表现为双因子增强,即两两因子的交互作用均大于单因子对植被覆盖度的影响力,说明各因素对于植被覆盖度的影响不是相互独立的,而是协同发生的。在建设期,降雨量与温度($q=0.262$)、坡度($q=0.246$)的两两交互作用表现为非线性增强,其余因子两两交互均表现为双因子增强,温度和坡度单因子对于植被覆盖度的影响较小,但与降雨量结合后解释力 q 值大于二者相加,说明温度因子和坡度因子对植被覆盖度空间分布的影响与其他因子相互作用后才能体现出来。在巩固期,降雨量与土壤质地($q=0.446$)、降雨量与土地利用方式($q=0.387$)的交互作用表现为非线性增强,其余因子两两交互表现为双因子增强。即降雨量与土壤质地和土地利用方式的交互作用对于巩固期植被覆盖空间分布的影响更强。

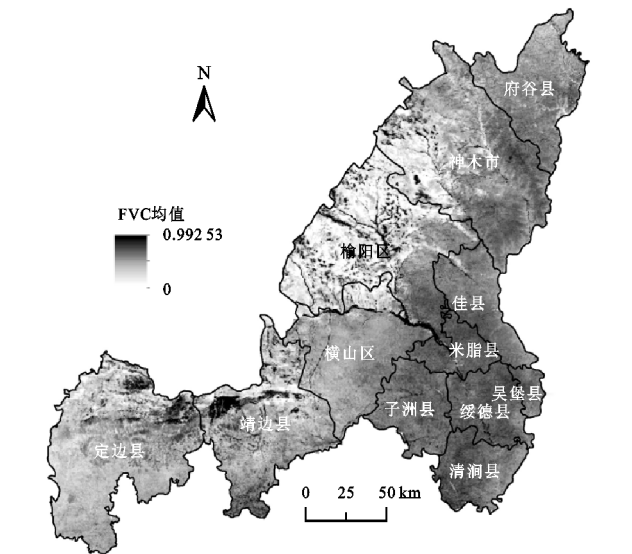


图 4 2001—2020 年榆林市平均年植被覆盖度空间分布

3 讨论

退耕还林草工程作为世界十大林业生态工程之一^[34]为黄土高原生态恢复及水土流失治理做出了巨大贡献。以榆林市为代表的黄土高原生态脆弱区植被覆盖变化更敏感,利于揭示退耕还林草工程对生态环境恢复的影响。本文基于 Modis 数据对 2001—2020 年植被覆盖度时空变化的分析显示,在时间尺度上,榆林市植被覆盖度呈显著上升趋势,年际变化主导因素为累积退耕还林草面积占比和降水量的动态变化。退耕还林草工程的大力实施是植被覆盖度增加的主要驱动力。榆林市地处干旱半干旱区,年平均降水量约 400 mm,水分条件也是制约该地区植物生产力重要的影响因素之一,植物生长对水分极为敏感^[35],因此植被覆盖度与降水量随时间的变化趋势较为一致。这与前人^[36-37]研究影响黄土高原植被生长的气象因素的研究结果一致。在空间尺度上,榆林市植被覆盖度呈增

加趋势的区域主要分布于东部,植被覆盖度呈减少趋势的植被主要分布于北部西侧和西部北侧。利用地理探测器方法进行空间异质性分析得出,2001—2020 年榆林市植被覆盖度的空间分异与土壤质地、降水量、土地利用方式密切相关。其中,土壤质地是决定植被覆盖度空间分布的关键性因素。榆林市土壤质地东部及南部的分布主要以壤土为主,而北部西侧及西部绝大部分位于毛乌素沙地境内(图 8),主要分布为砂粒含量 $>85\%$ 的砂土。2 种土壤在养分含量、持水性、土壤机械组成和团聚体含量等方面均存在明显差异。因此,尽管退耕还林草 20 年来此区域植被覆盖水平有一定改善,但该区域的植被覆盖水平整体仍较低。此外,由于降雨对于半干旱地区植被生长极

其有利,因此降雨量的空间分异很大程度上也决定了植被覆盖度的空间分异(图 9)。退耕还林草工程的实施使得榆林市土地利用结构由原来的耕地及未利用地转化为林地及草地,减少坡耕地的水土流失现象,同时实现了植被覆盖度的显著增加。因此在今后开展植被恢复实践中应充分考虑植被分布的空间异质性和主要影响因素之间的交互作用,不同生态地理区域需要进行因地制宜的植被恢复建设。例如,在植被覆盖较差的区域应合理的水土保持措施,减少人为干扰,在考虑土壤条件、水热条件的情况下,按照宜草则草、宜灌则灌的原则进行植被恢复建设;在植被覆盖度相对较好的区域,则应在保证现有植物正常繁衍的前提下增加植物种类和生物多样性。

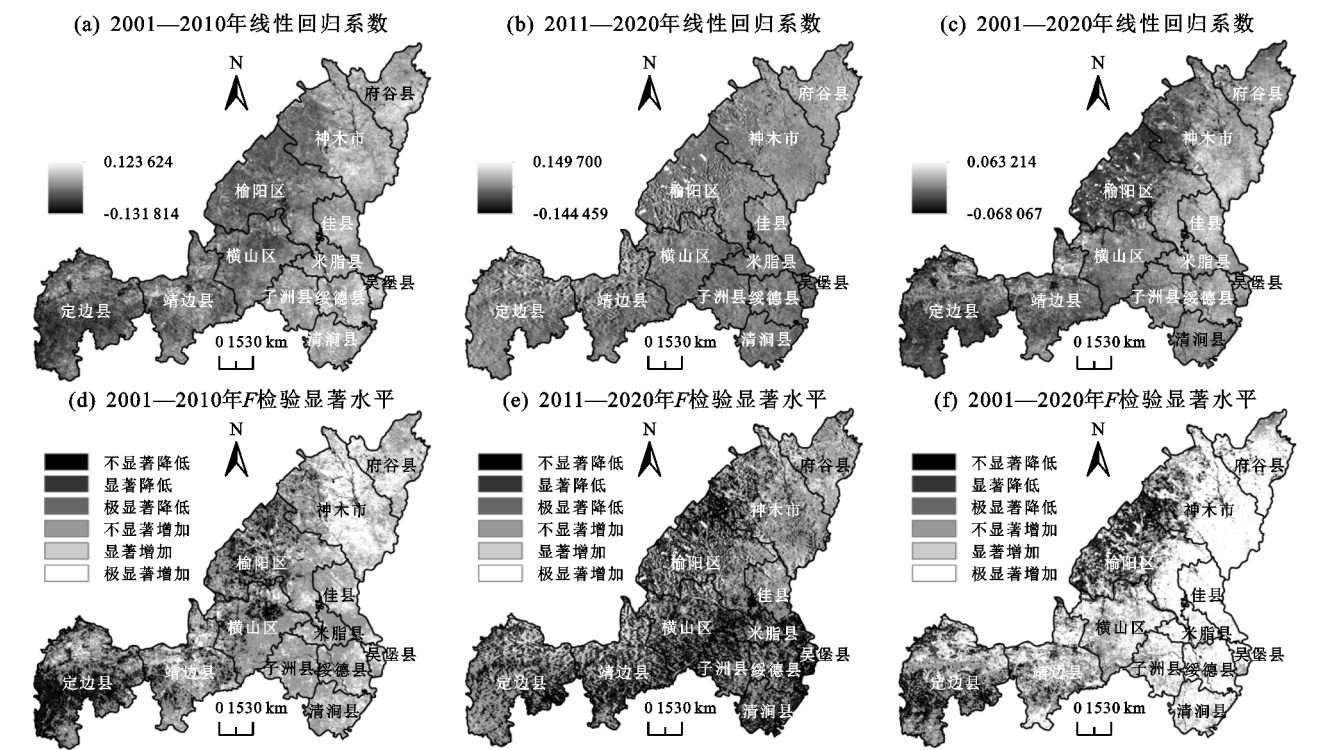


图 5 2001—2020 年榆林市植被覆盖度变化趋势及显著性检验

基于 PLR 误差方差最小判断时间节点划分的退耕还林草工程不同阶段与李世东^[38]提出的阶段划分结果一致。巩固期和建设期的植被覆盖度变化趋势及其影响因素分析显示,不同时期植被覆盖度变化的影响因素及因子交互作用均不同:在建设期,时间尺度上植被覆盖度的年际变化与气象因素的相关性较弱,而与累积退耕还林草面积变化的关系显著相关;空间尺度上土地利用方式也在建设期是影响植被覆盖空间分异的主要因素,表明建设期退耕还林草工程改变土地利用结构对增加林草地面积贡献巨大(图 10)。对比建设期和巩固期主导因素的差异,明显可见建设期人为因素对于植被覆盖度的影响也更为显著,这与建设期强度较高的人力和物力投入^[39]极大的削弱了气象因素的相对影响力直接相关。在巩固

期,退耕还林草的主要任务为林地管护及小面积退耕,尽管植被覆盖度的增加速率没有建设期大,但植被覆盖水平有了明显提高,此时植被覆盖水平已稳定向好,植被生长需要良好的水热环境以及养分维持,因此在巩固期,降水量的动态变化主要决定了植被覆盖度的年际变化,而土壤质地则主要决定了植被覆盖度的空间分异规律。因子交互作用方面,在建设期,降水量与坡度和温度的交互作用表现为非线性增强。首先,由于退耕还林草工程主要集中于榆林市东部的丘陵沟壑区,重点在于 $>25^\circ$ 坡耕地的退耕^[38],加上降水量在东部分布较多,因此退耕还林草工程实施后,导致以榆林市东部为代表性的区域植被覆盖度增加显著,故降水量和坡度的交互作用对于植被覆盖度的空间分异的影响明显强于单因子。

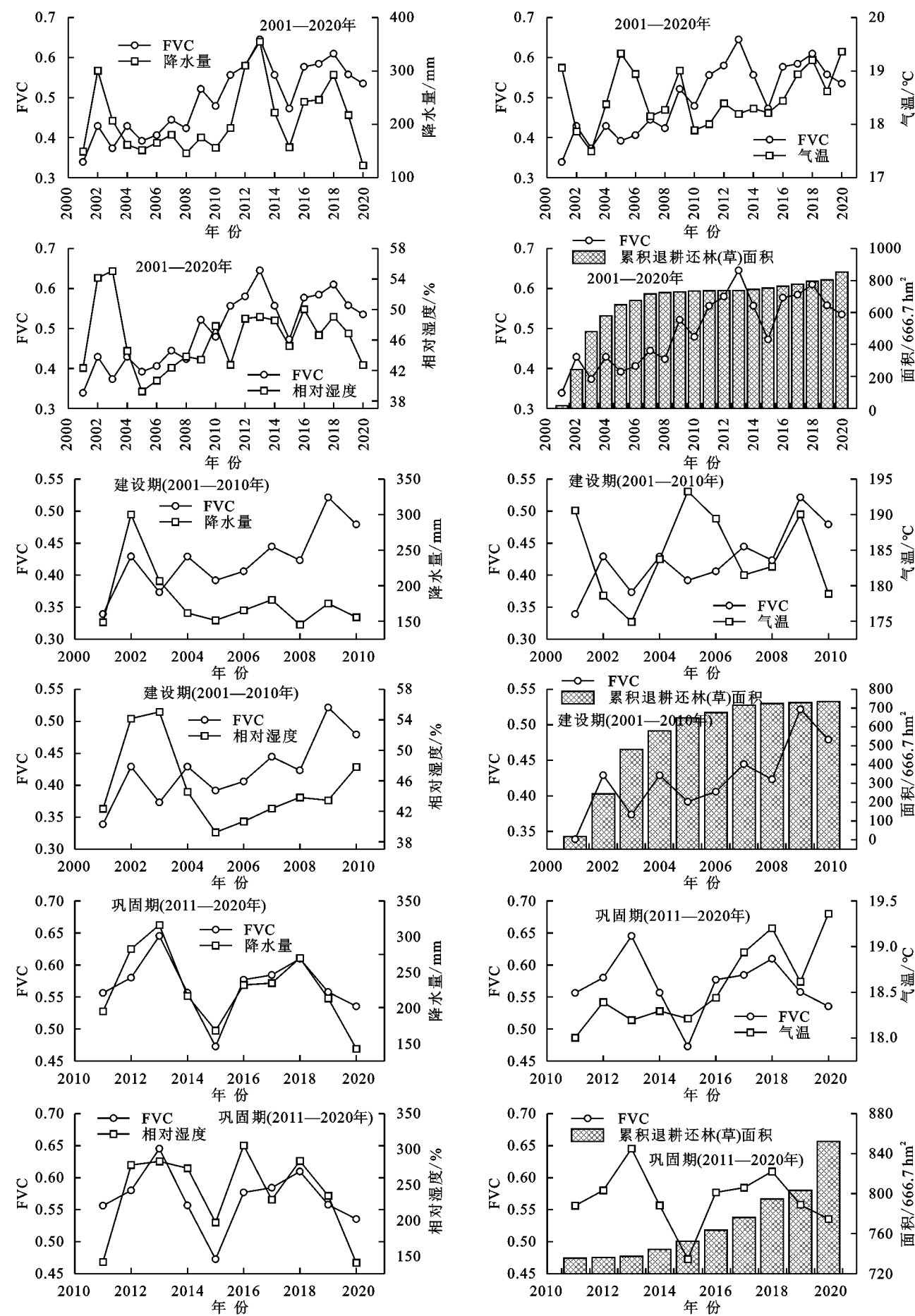


图 6 不同阶段植被覆盖度与影响因子的动态变化关系

表 3 植被覆盖度与影响因素的偏相关分析

因素	建设期		巩固期		2001—2020 年	
	偏相关系数	<i>p</i> 值	偏相关系数	<i>p</i> 值	偏相关系数	<i>p</i> 值
降水量	0.175	0.68	0.85 * *	0	0.59 * *	0.01
气温	−0.07	0.85	0.50	0.17	0.30	0.28
相对湿度	−0.16	0.67	0.59	0.09	0.38	0.10
累积退耕还林草面积	0.71 *	0.05	0.22	0.63	0.86 * *	0

注：* 表示显著相关($p<0.05$)；* * 表示极显著相关($p<0.01$)。

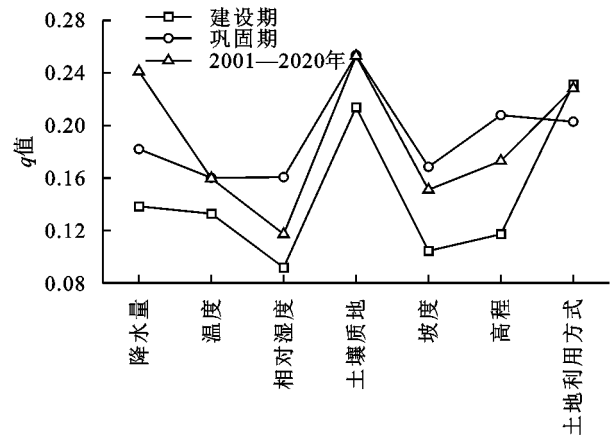


图 7 不同阶段植被覆盖度因子探测器结果

其次, 水热条件对于植被的生理生态过程以及物质能量的积累与分配也会产生巨大影响, 因此在退耕还林草植被大量生长的建设期, 降水量与温度的交互作用对于植被覆盖度空间分异的影响也较大。在巩固期, 降水量与土壤质地和土地利用方式的交互作用表现为非线性增强。此阶段植被覆盖格局已较为稳定, 由于榆林市降雨主要集中于 7, 8 月, 且以暴雨形式为主, 故在植被覆盖较为稀疏地域或无植被覆盖的土地, 土壤质地较差, 极易发生土壤水力侵蚀, 水土流失现象加剧; 然而对于植被分布较好的林地或草地, 其土壤团聚体含量较高, 在利于水土保持的同时促进植被的生长^[40]。

表 4 交互探测器结果

调查阶段	项目	降水量	相对湿度	温度	土壤质地	坡度	高程	土地利用方式
2001—2020 年	降水量	0.241a						
	相对湿度	0.331b	0.160a					
	温度	0.327b	0.231b	0.117a				
	土壤质地	0.387b	0.311b	0.339b	0.253a			
	坡度	0.301b	0.249b	0.265b	0.289b	0.151a		
	高程	0.330b	0.244b	0.210b	0.360b	0.306b	0.173a	
	土地利用方式	0.397b	0.325b	0.340b	0.367b	0.324b	0.363b	0.228a
建设期 (2001—2010 年)	降水量	0.138a						
	相对湿度	0.235b	0.133a					
	温度	0.246c	0.187b	0.092a				
	土壤质地	0.265b	0.265b	0.271b	0.214a			
	坡度	0.262c	0.187b	0.198b	0.239b	0.104a		
	高程	0.160b	0.181b	0.136b	0.276b	0.213b	0.117a	
巩固期 (2010—2020 年)	土地利用方式	0.315b	0.309b	0.305b	0.347b	0.305b	0.311b	0.231a
	降水量	0.182a						
	相对湿度	0.340b	0.160a					
	温度	0.288b	0.260b	0.161a				
	土壤质地	0.446c	0.315b	0.366b	0.254a			
	坡度	0.345b	0.278b	0.311b	0.299b	0.169a		
	高程	0.314b	0.284b	0.248b	0.395b	0.330b	0.185a	
	土地利用方式	0.387c	0.311b	0.354b	0.35b	0.313b	0.380b	0.203a

注：a 表示单因子解释力；b 表示双因子增强；c 表示非线性增强，非线性增强效果大于双因子增强。

本文基于地理探测器方法对榆林市植被覆盖度空间分异的驱动力进行探究, 将量化难度较大的类型变量(土壤质地、土地利用方式)纳入因素分析中, 并考虑因素间的交互作用。因此该方法可准确量化多因素影响

的植被覆盖度, 从而为生态恢复措施的精准实施提供科学依据。具体而言, 若降水量与土壤质地和坡度之间存在较强的交互作用, 则当降水量为关键因素时, 选择土壤质地和地貌类型良好的区域对于植被恢复至关重要。

此外本研究虽采用地理探测器方法分析了气象因素、地理因素、人为因素对植被覆盖度的影响,但尚未系统的考虑所有影响因子,如人口密度、地方经济发展等社会经济类指标。若今后的研究中能制定出一套综合的评判指标体系,则能对该区域或类似区域的植被恢复实践起到更准确、全面的指示作用。

手段。此外,在植被恢复建设中也应注意因地制宜,对于 $>25^{\circ}$ 的耕地应严格推进退耕还林草的实施,对于 $<25^{\circ}$ 的耕地应着重改善土壤质量,提高保水保肥性能,进而提升耕地利用效率。尽管退耕还林草 20 年来榆林市植被覆盖度整体呈上升趋势,但研究发现,榆林市退耕还林草巩固期较建设期植被覆盖度呈降低趋势的面积增多,这可能与干旱的气候和大面积的森林种植相关,因为前人^[42]研究认为,黄土高原的退耕还林草工程、三北防护林等大规模植被恢复工程造成区域耗水量、蒸散量增大,进而影响区域水文平衡。因此,后期对于植被的管护和巩固需加强前期实施方案合理的论证,如节水抗旱树种的选择、造林密度的调整、水资源承载能力的估算等,以保证植被恢复的可持续,尤其是对于黄土高原生态脆弱区的植被恢复策略需要深入探究。

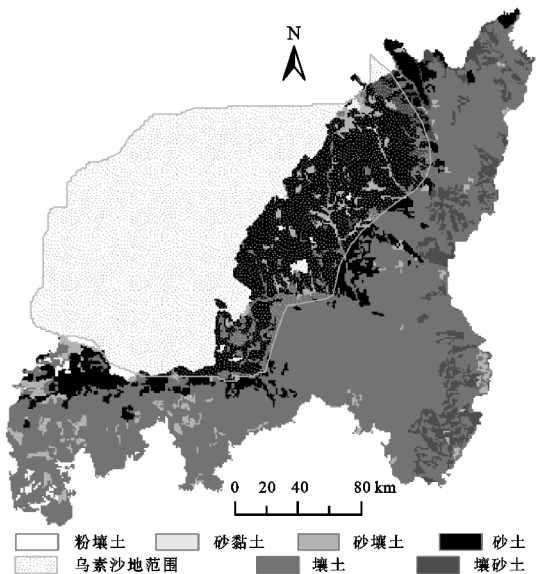


图 8 榆林市土壤质地空间分布

退耕还林草工程的实施极大地改善了以榆林市为代表的黄土高原生态脆弱区的生态环境状况,植被覆盖水平在工程实施的 20 年来明显提升,呈现出土壤侵蚀强度降低,生态服务价值升高的趋势,取得明显的水土保持效益^[41]。即合理的植被恢复建设是水土流失治理的有效措施,也是改善生态环境的必要

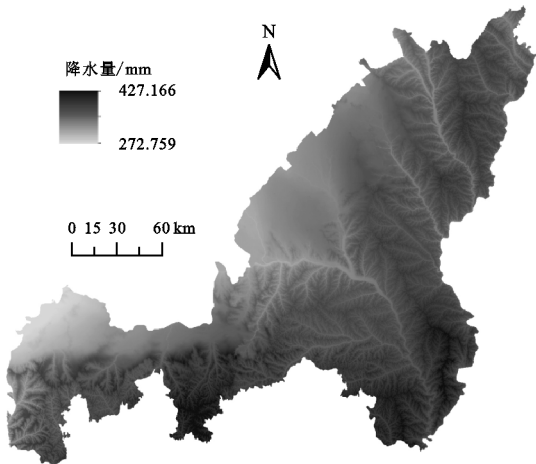


图 9 榆林市平均年降水量空间分布

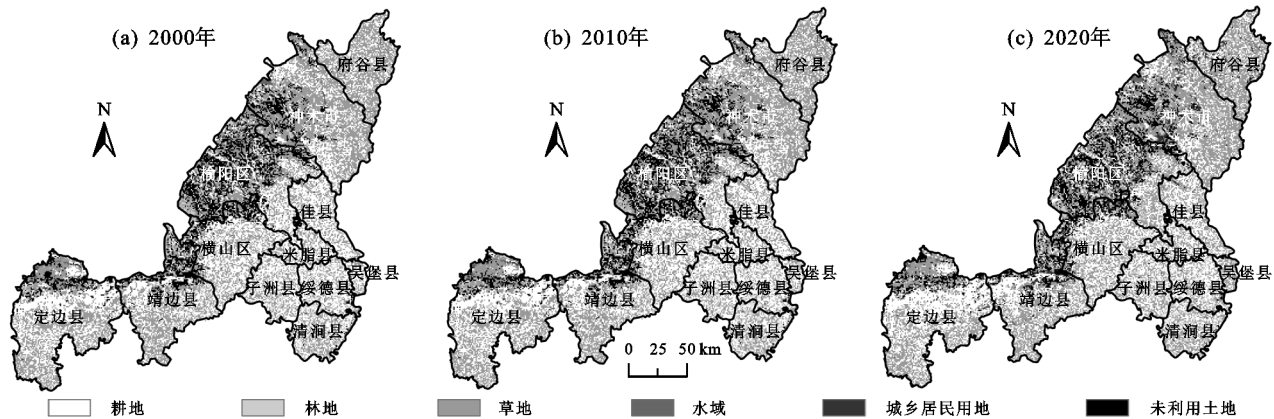


图 10 2000 年、2010 年、2020 年榆林市土地利用方式空间分布

4 结论

(1)2001—2020 年榆林市植被覆盖度随时间变化明显,整体呈显著增加趋势($S=0.011, p<0.01$)。建设期榆林市整体植被覆盖度显著增加($S=0.013, p<0.01$),而巩固期增加趋势不显著($S=0.005, p>0.05$)。

(2)2001—2020 年榆林市植被覆盖度空间分布表现为呈由东向西递减的格局,高值区主要分布于东南部黄

土高原丘陵沟壑区,这与该区域是退耕还林草的重点建设区域密切相关。榆林市各县(区)植被覆盖度整体以增长趋势为主,呈增加趋势的面积共占比为 84.5%,主要分布于榆林市东部,呈降低趋势的区域占总面积的 15.4%,主要分布在榆阳区、定边县、靖边县、神木市西部及城镇化发展速度较快的区域。建设期呈增加趋势面积占比(82.1%)明显多于巩固期(58.0%)。

(3)2001—2020 年累积退耕还林草面积和降水量的动态变化对植被覆盖度年际变化影响较大。在建设期,累积退耕还林草面积的动态变化为影响植被覆盖度年际变化的主要因素,而在巩固期降水量的动态变化则与植被覆盖度年际变化关系较为一致。

(4)2001—2020 年影响植被覆盖度空间分异的主要因素为土壤质地和降水量。在建设期土地利用方式和土壤质地主要解释了植被覆盖度空间分异,在巩固期仅为土壤质地;其次,两两因素的交互作用对于植被覆盖度的影响均存在明显的增强型交互作用。

参考文献:

- [1] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 76-87.
- [2] 张清春, 刘宝元, 翟刚. 植被与水土流失研究综述[J]. *水土保持研究*, 2002, 9(4): 96-101.
- [3] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 774-782.
- [4] 吴昌广, 周志翔, 肖文发, 等. 基于 MODIS NDVI 的三峡库区植被覆盖度动态监测[J]. *林业科学*, 2012, 48(1): 22-28.
- [5] 张东海, 任志远, 王晓峰, 等. 基于 MODIS 的陕西黄土高原植被覆盖度变化特征及其驱动分析[J]. *生态与环境学报*, 2013, 29(1): 29-35.
- [6] 张兴昌, 刘国彬, 付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J]. *环境科学*, 2000, 21(6): 16-19.
- [7] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [8] 王升, 王全九, 董文财, 等. 黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 23-27.
- [9] 秦伟, 朱清科, 张学霞, 等. 植被覆盖度及其测算方法研究进展[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(9): 163-170.
- [10] 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.
- [11] 程红芳, 章文波, 陈锋. 植被覆盖度遥感估算方法研究进展[J]. *国土资源遥感*, 2008, 20(1): 13-18.
- [12] 陈晓光, 李剑萍, 韩颖娟, 等. 宁夏近 20 年来植被覆盖度及其与气温降水的关系[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1375-1383.
- [13] 王晓峰, 任志远. 基于 RS 和 GIS 的榆林市植被覆盖度动态变化研究[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(3): 101-104.
- [14] 杨波, 王全九, 许晓婷, 等. 还林还草工程后榆林市 NDVI 时空变化趋势[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(6): 1839-1848.
- [15] 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.
- [16] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [17] 陈业滨, 李卫红, 黄玉兴, 等. 广州市登革热时空传播特征及影响因素[J]. *热带地理*, 2016, 36(5): 767-775.
- [18] 丁悦, 蔡建明, 任周鹏, 等. 基于地理探测器的国家级经济技术开发区经济增长率空间分异及影响因素[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(5): 657-666.
- [19] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000—2011 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征及驱动因素解析[J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 2079-2092.
- [20] 于佳, 刘吉平. 基于地理探测器的东北地区气温变化影响因素定量分析[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(19): 4682-4687.
- [21] 王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J]. *地理学报*, 2018, 73(9): 1674-1686.
- [22] 刘大元, 张雪梅, 岳跃民, 等. 基于 Geodetector 的广西喀斯特植被覆盖变化及其影响因素分析[J]. *农业现代化研究*, 2019, 40(6): 1038-1047.
- [23] 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 等. 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. *生态学报*, 2019, 39(5): 1583-1594.
- [24] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 11-19.
- [25] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [26] 李登科, 王钊. 退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 1-10.
- [27] 马锋, 卓静, 何慧娟, 等. 陕西省榆林市植被生态演变及其驱动机制[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(5): 257-261.
- [28] 刘玉安, 黄波, 程涛, 等. 基于像元二分模型的淮河上游植被覆盖度遥感研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(1): 93-97.
- [29] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1414-1434.
- [30] 黄瑾, 杨武年, 张敏, 等. 普格县植被覆盖度遥感动态监测分析[J]. *地理空间信息*, 2009, 7(2): 51-53.
- [31] Gu Z, Duan X W, Shi Y D, et al. Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 54-64.
- [32] 裴志林, 杨勤科, 王春梅, 等. 黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(3): 546-555.

- 变化分析[J].水土保持通报,2012,32(5):182-185.
- [9] 罗玉,陈超,马振峰,等.四川盆地夏季区域性极端降水事件特征及其成因[J].西南大学学报(自然科学版),2019,41(5):128-138.
- [10] 符艳红,谢世友,高洁.基于 Mann—kendall 法的嘉陵江流域降水量时空分布规律[J].西南大学学报(自然科学版),2018,40(6):132-139.
- [11] 袁梦,马力.渠江流域汛期强降水时空分布特征[J].高原山地气象研究,2014,34(1):15-21.
- [12] 卢丽.北京市清河流域极端降水及防汛预警指标研究[D].北京:中国农业大学,2017.
- [13] 梅静,王建,何亮,等.川西甘孜州 1961—2015 年气温和降水时空变化特征研究[J].山地学报,2019,37(2):161-172.
- [14] Wang W T, Yin S, Xie Y, et al. Effects of four storm patterns on soil loss from five soils under natural rainfall[J].Catena,2016,141:56-65.
- [15] 马俊明,齐实,程柏涵,等.云南省红河下游暴雨特征分析:以河口县为例[J].中国水土保持科学,2018,16(6):99-107.
- [16] 张铁钢.丹江中游小流域水—沙—养分输移过程研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [17] 程甜甜,张兴刚,李亦然,等.鲁中南山丘区坡面产流产沙与降雨关系[J].水土保持学报,2017,31(1):12-16.
- [18] 焦玮,朱仲元,宋小园,等.近 50 年气候和人类活动对锡林河流域径流的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(6):12-19.
- [19] 唐建.基于 MK 检验的天山山区近 55 年降水特征分析[J].甘肃水利水电技术,2019,55(1):5-8.
- [20] Anish K W, Kizhur S, Rajasekharaiah S. Climatic periodicities recorded in lake sediment magnetic susceptibility data: Further evidence for solar forcing on Indian summer monsoon[J].Geoscience Frontiers,2017,8(6):1349-1355.
- [21] 桑燕芳,王中根,刘昌明.小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J].地理科学进展,2013,32(9):1413-1422.
- [22] 苏布达,姜彤,任国玉,等.长江流域 1960—2004 年极端强降水时空变化趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):9-14.
- [23] 王润科,杨磊,叶青.陇南嘉陵江流域年降水量空间结构的趋势面分析[J].首都师范大学学报(自然科学版),2013,34(6):86-91.
- (上接第 208 页)
- [33] Nie T, Dong G T, Jiang X H, et al. Spatio-temporal changes and driving forces of vegetation coverage on the Loess Plateau of Northern Shaanxi [J]. Remote Sensing,2021,13(4):613-630.
- [34] Liu Y S, Li J T. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China[J].Acta Geographica Sinica,2017,72(1):161-173.
- [35] 李世东,翟洪波.世界林业生态工程对比研究[J].生态学报,2002,22(11):1976-1982.
- [36] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, et al. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999[J].International Journal Of Biometeorology,2001,45(4):184-190.
- [37] 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.
- [38] 李世东.中国退耕还林发展阶段研究[J].世界林业研究,2003(1):36-41.
- [39] Sun W Y, Mu X M, Song X Y, et al. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960—2013 under global warming[J].Atmospheric Research,2016,168:33-48.
- [40] 刘梦云,常庆瑞,安韶山,等.土地利用方式对土壤团聚体及微团聚体的影响[J].中国农学通报,2005,21(11):247-250.
- [41] 张琨,吕一河,傅伯杰.黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响[J].生态与农村环境学报,2017,33(1):23-31.
- [42] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11):1019-1022.