

近20年黄河流域甘肃段植被覆盖度变化与驱动因素分析

田云¹ 刘俊艳¹ 白爽² 孙建欣² 郑晓雄² 孙中平²

(1. 甘肃省生态环境信息中心, 兰州 730030; 2. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要: 黄河流域甘肃段作为我国重要水源涵养区和北方防沙带建设区, 掌握其植被变化及驱动力对流域生态保护和高质量发展具有重要意义。基于2001—2022年MODIS NDVI数据集, 利用像元二分法、变异系数、趋势分析法、Hurst指数和地理探测器, 分析了近20年来黄河流域甘肃段植被变化趋势及驱动力。结果表明: 2001—2022年黄河流域甘肃段FVC在波动中呈上升趋势, 植被生长呈向好趋势。近20年间黄河流域甘肃段近1/2区域具有相对高-高波动性, 主要集中分布在流域北部的黄土高原区, 中波动性、相对低-低波动性主要分布在甘南高原区和陇南山地等区域。黄河流域甘肃段大部分地区植被呈改善趋势, 少部分区域表现为退化, 未来植被变化将呈反持续性。驱动力分析表明降水量、植被类型和土壤类型对黄河流域甘肃段植被覆盖起主导作用。

关键词: 黄河流域甘肃段; 植被覆盖度; 驱动因素; Hurst指数; 地理探测器

中图分类号: X87

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)07-0365-08

OSID:



Fractional Vegetation Cover Change and Driving Factors in Gansu Section of Yellow River Basin

TIAN Yun¹ LIU Junyan¹ BAI Shuang² SUN Jianxin² ZHENG Xiaoxiong² SUN Zhongping²

(1. Ecological Environment Information Center of Gansu Province, Lanzhou 730030, China)

2. Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China)

Abstract: The Gansu section of the Yellow River Basin, a crucial ecological security barrier in China, plays a vital role in water conservation and northern desertification control. Understanding the vegetation changes and driving forces is crucial for the ecological protection and high-quality development of the basin. Based on the MODIS NDVI dataset from 2001 to 2022, the vegetation change trend and driving force in the Gansu section of the Yellow River Basin over the past 20 years were analyzed by using pixel dichotomy, coefficient of variation, trend analysis, Hurst index and geographic detector. The results showed that the FVC in Gansu section of the Yellow River Basin showed an increasing trend during 2001—2022, indicating a positive vegetation growth. In the past 20 years, nearly 1/2 of the Gansu section of the Yellow River Basin had relatively high-high volatility, which was mainly distributed in the northern Loess Plateau region, while the medium volatility and relatively low-low volatility were mainly distributed in the Gannan Plateau region and the Longnan Mountain region. The vegetation in most areas of the Gansu section of the Yellow River Basin showed an improvement trend, while a few areas showed degradation, indicating a potential anti-sustainable trend in future vegetation changes. The analysis of driving forces indicated that precipitation, vegetation type and soil type were the predominant factors influencing vegetation cover in Gansu section of the Yellow River Basin.

Key words: Gansu section of the Yellow River Basin; fractional vegetation cover; driving factors; Hurst index; geographic detector

收稿日期: 2024-01-09 修回日期: 2024-04-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB390110503)

作者简介: 田云(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事生态环境信息化建设及应用研究, E-mail: 644549809@qq.com

通信作者: 白爽(1995—), 女, 工程师, 主要从事环境遥感研究, E-mail: baishuang@secmep.cn

0 引言

植被作为陆地生态系统的主体,具有明显的年际和季节变化特点,常被作为区域生态系统的“指示器”^[1]。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。FVC 是衡量地表植被生长状况的重要指标之一,是描述生态系统的重要基础数据,对衡量区域生态环境质量具有重要意义。

植被作为生态系统的重要组分,受自然环境中各要素的影响,环境中气候因素(如温度、降水、光照等)的变化与植被变化密切相关。在区域尺度上,气候因素对不同区域植被变化的影响存在明显差异,针对植被与气候因素相关性研究方面,大部分集中在植被对温度、降水量的响应^[2-4]。王祎宸等^[5]基于 MODIS NDVI(Normalized difference vegetation index)数据集,研究了黄河流域不同植被分区物候对温度和降水量的响应,结果表明不同植被地带气候对植被物候存在明显差异。CHEN 等^[6]利用 MODIS NDVI 数据集,研究了西南喀斯特地区植被变化与温度和降水量的关系,结果表明西南地区的植被绿化主要受温度控制,与降水量的相关性较小。除温度、降水量外,其他环境因素,如地形、海拔、土地利用类型及其他气候因素也将直接或间接影响区域植被变化。WANG 等^[7]利用退耕还林工程区域作为研究区域,估算了 2000—2010 年退耕还林还草工程(Grain for Green Program, GGP)区域的植被活动,研究表明 2000—2010 年间 GGP 地区植被活动明显改善。燕丹妮等^[8]利用 GIMMS NDVI 数据分析了黄土高原植被变化与温度、降水量、日照时数的关系,研究表明在黄土高原的大部分区域温度、降水量、日照时数与 FVC 变化呈显著正相关。

黄河流域在我国社会经济发展和生态安全方面十分重要,是我国重要的生态屏障。黄河流域甘肃段作为黄河流域重要的水源涵养区和补给区,承担着黄河上游生态修复、水土保持和污染防治的重任。目前,针对黄河流域生态环境状况的研究多集中于植被变化趋势及驱动因素分析。李雪银等^[9]基于 1982—2021 年 NDVI 数据集研究发现,黄河流域多年 NDVI 均值年际变化呈波动增长趋势,影响因素分析表明人类活动对黄河流域植被恢复起主导作用。田智慧等^[10]基于 2000—2020 年 MODIS NDVI 数据集研究发现,黄河流域生长季 NDVI 与降水量的相关性高于气温,且人类活动对植被变化的贡献大于气候因素。岳萌等^[11]基于 SPOT NDVI 数据集

对黄河流域陕西段植被 NDVI 变化的驱动因素进行分析,发现人类活动是植被变化的主要驱动力,气候变化和人类活动共同作用次之,气候变化贡献最小。

综上所述,已有研究主要定性分析了黄河流域植被变化趋势及驱动因素,针对不同驱动因素及其交互作用的相对贡献定量化分析不足,且研究数据空间分辨率多为千米级,难以支撑精细化监管需求。从空间角度来看,目前针对黄河流域的研究多聚焦于流域尺度,对黄河流域甘肃段 FVC 的长时间序列分析及驱动力研究鲜有报道,其生态变化特征及机理分析缺少研究数据支撑。因此,本文利用 GEE(Google earth engine)平台开展 2001—2022 年黄河流域甘肃段 FVC 反演,同时基于趋势分析、变异系数、Hurst 指数、相关性分析及地理探测器等算法模型在 250 m 尺度定量探究黄河流域甘肃段植被时空变化规律及驱动因素,以期为黄河流域甘肃段的生态恢复、水土保持等提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄河流域甘肃段位于黄河流域中上游,介于北纬 33°~38°和东经 100°~109°之间(图 1),地跨兰州市、天水市、白银市、定西市、庆阳市、平凉市、临夏回族自治州、甘南藏族自治州、武威市 9 个市(州),总面积 $1.459 \times 10^5 \text{ km}^2$,占甘肃全省总面积的 34.3%。黄河流域甘肃段地貌复杂多样,地跨甘南高原区、陇中黄土高原丘陵沟壑区、陇东黄土高原区等地貌单元^[12]。流域地势自西南向东北倾斜,平均海拔 2 200 m^[13]。受地形影响,流域内涉及 4 个气候分区,气候干旱少雨,气温温差较大,光照充足,年均气温在 0~14℃ 之间,年平均降水量小于 400 mm^[14]。受地形、气候、土壤类型等多种因素的影响,黄河流域甘肃段植被类型丰富多样,包括温带

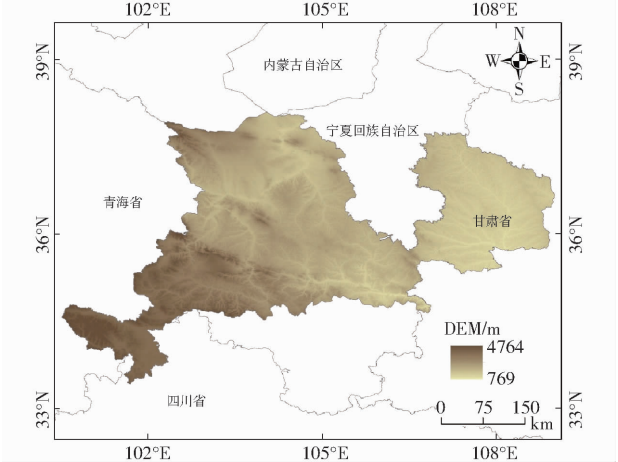


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

草原、温带荒漠、森林、灌丛等。近年来,随着生态保护工程和退耕还林政策的实施,该区域植被得到有效恢复。然而,局部地区仍然存在植被退化的现象。黄河流域甘肃段作为重要水源涵养区和北方防沙带建设区,生态系统复杂典型,具有重要的研究价值。

1.2 数据来源

本文使用的矢量边界数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。遥感数据为 MODIS NDVI 数据集,来源于美国 NASA 数据中心发布的归一化植被指数合成 MOD13Q1 数据产品,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,时间序列为 2001—2022 年。该数据已进行了辐射定标、云检测、大气订正等处理,增强了对植被的敏感度^[15]。获取的 NDVI 数据采用国际通用的最大值合成法合成以减少云、大气、太阳高度角等的影响。气象数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<https://www.geodata.cn/>),包括 2001—2022 年的年均温和年降水量数据,空间分辨率为 1 km。土地利用数据来源于 CLCD (China land cover dataset) 数据集,该数据集基于随机森林分类得到,空间分辨率为 30 m^[16]。其他数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,包括 DEM 数据、土壤类型数据、地貌类型数据、植被类型数据及人口数据。鉴于不同数据集的空间分辨率不同,本文使用最近邻重采样方法将所有数据统一网格化到 250 m × 250 m。所有数据还经过投影变换、均值计算、裁剪等预处理,以确保数据在空间投影、时间序列上的一致性,进而减少潜在偏差,保证研究结果的准确性和可靠性。

1.3 研究方法

1.3.1 像元二分模型

大范围的地表 FVC 估算可以利用遥感手段,目前像元二分模型常被应用于 FVC 估算。像元二分模型假设影像上一个像元的信息只由植被和无植被覆盖(裸土)两部分组成^[17]。计算公式为

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

式中 f_c ——植被覆盖度

$NDVI_{soil}$ ——无植被覆盖(裸土)区域的 NDVI 值

$NDVI_{veg}$ ——纯植被覆盖区域的 NDVI 值

在没有实测数据的情况下,取 95% 置信度的置信区间内最大值 $NDVI_{max}$ 与最小值 $NDVI_{min}$ 分别作为 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 。

1.3.2 变异系数

变异系数(CV)是植被研究中常用的变量,主要用来反映数据离散程度和植被年际波动^[18]。

1.3.3 Sen + Mann - Kendall 趋势分析法

线性回归法易受噪声干扰,要求时间序列数据符合正态分布。Theil - Sen 回归是一种非参数估计方法,可以很好地减少噪声干扰,是环境时间序列数据中广泛使用的方法^[19]。本文基于 Theil - Sen 方法分析 FVC 的变化趋势,并利用 Mann - Kendall 方法进行显著性分析。时间序列趋势计算公式为

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (\forall j > i) \quad (2)$$

式中 β ——时间序列趋势

x_i, x_j ——第 i, j 时间序列的 FVC

Mann - Kendall 趋势检验统计量为

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j > x_i) \\ 0 & (x_j = x_i) \\ -1 & (x_j < x_i) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{VAR}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中 Z ——标准化后检验统计量

S ——检验统计量

n ——序列中数据数量

当 $\beta > 0$ 时,时间序列呈上升趋势,反之呈下降趋势。利用 Mann - Kendall 方法进行趋势显著性检验时,采用双边检验, Z 绝对值大于 1.96、2.58 分别表明变化趋势通过 0.05 和 0.01 水平的显著性检验。

1.3.4 Hurst 指数

利用 Hurst 指数(H)对植被变化趋势进行分析。当 $0 < H < 0.5$ 时,表明时间序列具有反持续性;当 $H = 0.5$ 时,表明时间序列为随机序列,即未来变化趋势难以确定;当 $0.5 < H < 1$ 时,表明时间序列具有可持续性。

1.3.5 地理探测器

地理探测器是一种检测空间异质性和量化驱动因素影响的统计方法,常用于各种现象的驱动力、影响因素和多因素相互作用分析^[20]。地理探测器包含因子探测、交互探测、风险探测、生态探测 4 部分^[21]。本文选取因子探测和交互探测分析自然因素和人类活动对植被空间分异的影响。

2 结果与分析

2.1 FVC 时空变化

基于像元二分模型计算得到 2001—2022 年逐年的 FVC 年均值,对 FVC 年均值取像元平均值表示当年植被的整体状态。根据现有的分级原则,对 FVC 进行分级统计,黄河流域甘肃段 FVC 分级面积占比统计及空间分布情况分别如表 1 和图 2 所示。黄河流域甘肃段 2001—2022 年 FVC 均值在 0.44 ~ 0.52 波动变化,整体呈上升趋势,变化速率为 0.002 3/a,FVC 最大值出现在 2020 年,最小值出现在 2002 年。近 20 年内黄河流域甘肃段 FVC 均值

为 0.48,整体上呈现西高东低、南高北低的分布趋势。

表 1 黄河流域甘肃段 FVC 分级面积占比统计
Tab.1 Statistics on proportion of FVC graded area in Gansu section of Yellow River Basin

FVC	植被状况	FVC 分级面积占比/%				
		2001 年	2010 年	2015 年	2022 年	多年均值
0 ~ 0.2	低植被覆盖	28.78	20.68	21.73	20.20	22.04
0.2 ~ 0.4	较低植被覆盖	18.92	18.94	16.93	18.49	19.58
0.4 ~ 0.6	中植被覆盖	17.58	17.96	19.23	21.38	18.95
0.6 ~ 0.8	较高植被覆盖	14.86	20.58	24.66	25.70	22.95
0.8 ~ 1.0	高植被覆盖	19.86	21.84	17.45	14.23	16.48

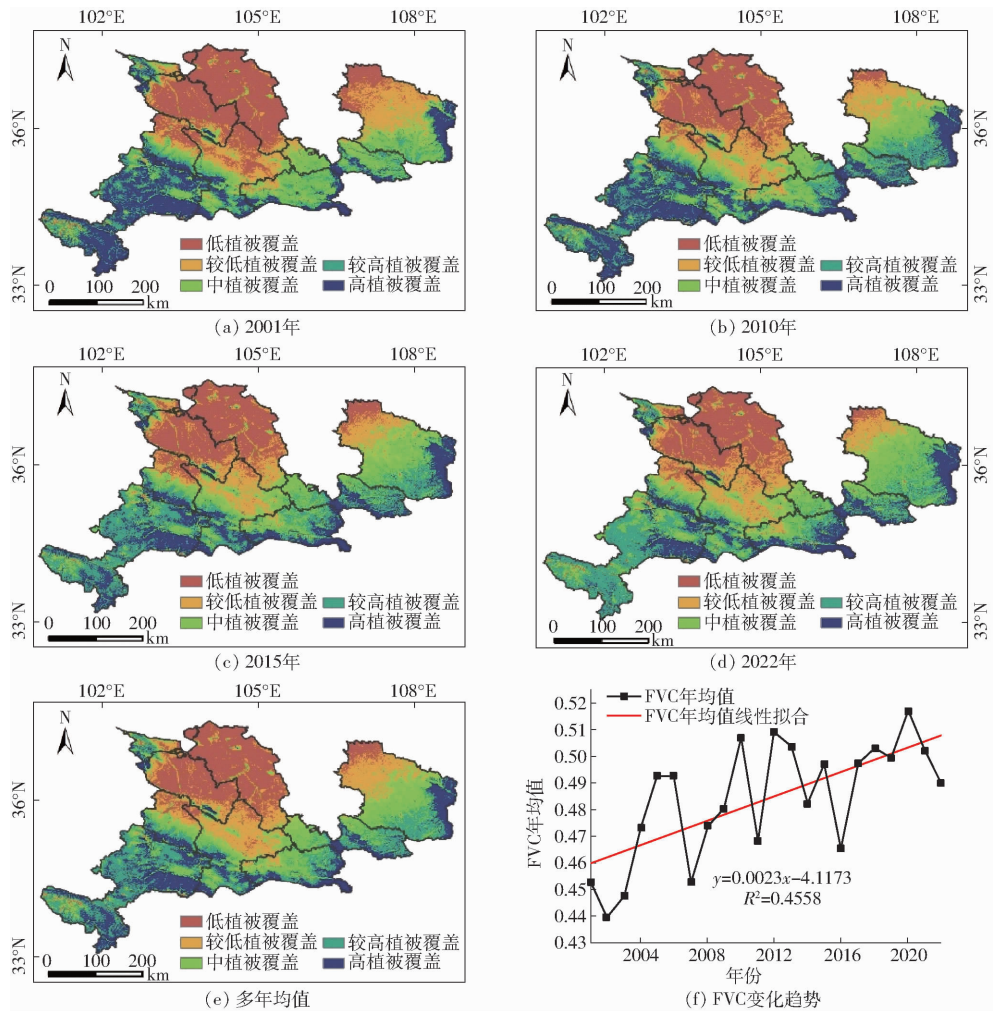


图 2 黄河流域甘肃段 FVC 分级空间分布

Fig.2 Spatial distributions of FVC grades in Gansu section of Yellow River Basin

由表 1 可知,近 20 年间黄河流域甘肃段低植被覆盖和较低植被覆盖面积逐年减少,中植被覆盖和较高植被覆盖面积逐年增加,整体上植被生长呈向好趋势。由图 2 可以看出,2001 年黄河流域甘肃段高植被覆盖和较高植被覆盖主要集中分布在流域甘南藏族自治州;中植被覆盖主要分布在流域南部区域;低植被覆盖和较低植被覆盖主

要集中分布在流域北部区域,包括兰州市、白银市和定西市北部。

相较 2001 年,2010 年黄河流域甘肃段 FVC 较高植被覆盖和高植被覆盖面积增加 7.67%,空间上较高植被覆盖和高植被覆盖区域北移。2015 年黄河流域甘肃段 FVC 高植被覆盖面积有所减少,较高植被覆盖面积继续增加至 24.66%,空间上表现为

向流域北部继续扩张。2022 年植被覆盖相较 2015 年无明显变化,植被生长趋于稳定。

如图 2e 所示,近 20 年来黄河流域甘肃段高植被覆盖和较高植被覆盖区域面积占比 39.43%,主要集中在流域南部甘南高原区和陇南山地;中植被覆盖区域面积占比 18.95%,主要分布在陇中黄土高原南部;低植被覆盖和较低植被覆盖区域面积占比 41.62%,主要集中分布在流域北部陇中黄土高原区域。

2.2 FVC 波动性

根据已有的分级原则,将黄河流域甘肃段的 CV 分为 5 级:高波动率(≥ 0.20)、相对高波动率($0.15 \sim 0.20$)、中波动率($0.10 \sim 0.15$)、相对低波动率($0.05 \sim 0.10$)、低波动率($0 \sim 0.05$)。表 2 为黄河流域甘肃段 FVC 变异系数在像素尺度上的统计分类结果。如表 2 所示,黄河流域甘肃段近 1/2 区域具有相对高-高波动性,50.83% 区域植被覆盖具有中-低波动性。

表 2 黄河流域甘肃段 CV 分级面积占比统计

Tab.2 Statistics on proportion of CV graded area in Gansu section of Yellow River Basin

CV	波动程度	面积占比/%
≥ 0.20	高波动率	37.78
$0.15 \sim 0.20$	相对高波动率	11.39
$0.10 \sim 0.15$	中波动率	16.36
$0.05 \sim 0.10$	相对低波动率	24.21
$0 \sim 0.05$	低波动率	10.26

图 3 为黄河流域甘肃段 FVC 变异系数空间分布图。近 20 年间黄河流域甘肃段植被覆盖相对高-高波动性区域主要集中分布在流域北部的黄土高原区,包括兰州市、白银市、定西市北部、临夏回族自治州北部和庆阳市北部区域;中波动性主要分布在流域东南部,包括天水市、平凉市、庆阳市南部等区域;相对低-低波动性主要分布在流域西南部的甘南高原区和陇南山地,包括甘南藏族自治州、临夏回族自治州南部、定西市南部等区域。

2.3 FVC 变化可持续性

利用 Sen + Mann - Kendall 趋势分析法得到黄河流域甘肃段 2001—2022 年间植被变化趋势图(图 4a)。黄河流域甘肃段大部分地区植被呈现改善趋势,其中轻微增长和显著增长区域占比 40.69%,主要分布在陇中、陇东地区;轻微退化和显著退化区域占比 20.38%,主要分布在甘南高原区;38.93% 区域变化不显著。

黄河流域甘肃段 FVC 的 Hurst 指数平均值为 0.47,整体上呈现反持续性。为进一步揭示趋势变

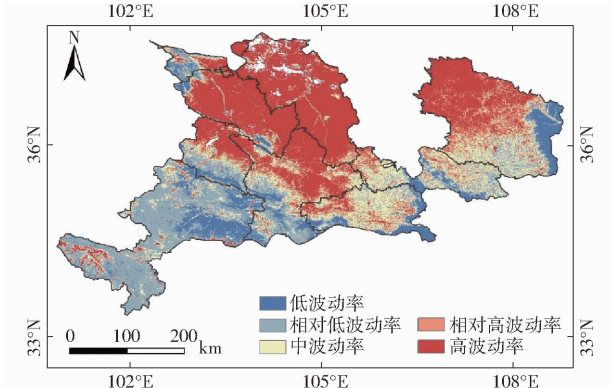


图 3 黄河流域甘肃段 FVC 变异系数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of FVC variation coefficient in Gansu section of Yellow River Basin

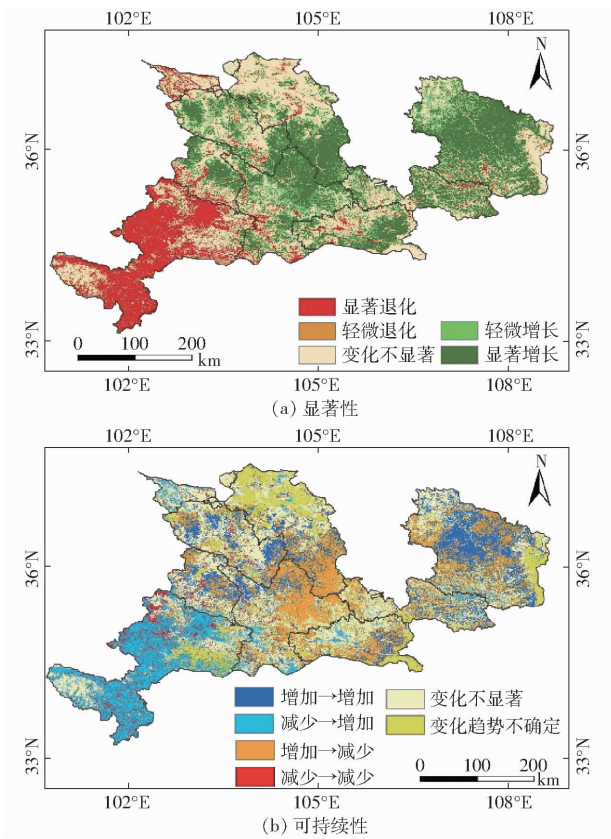


图 4 黄河流域甘肃段年均 FVC 变化趋势显著性分析及可持续性特征

Fig.4 Significance analysis of annual average FVC change trends in Gansu section of Yellow River Basin and sustainability characteristics

化和植被可持续性,使用 Theil - Sen 趋势分析和 Mann - Kendall 趋势检验结果与 Hurst 指数结果进行叠加分析,以产生趋势变化和可持续性的耦合信息(图 4b)。未来黄河流域甘肃段植被覆盖呈增加趋势区域占比 30.73%,主要分布在甘南藏族自治州、庆阳市中部、临夏回族自治州、兰州市等部分区域;未来黄河流域甘肃段植被覆盖呈减少趋势区域占比 29.48%,主要分布在流域东南部,包括白银市

南部、定西市东部、天水市南部、平凉市东部以及庆阳市等区域;32%区域变化不显著,主要零星分布在陇中地区;7.79%区域未来变化趋势不确定,主要分布在庆阳市东部、天水市东南部、甘南藏族自治州东南部、白银市北部等区域。

2.4 FVC 变化驱动因子分析

2.4.1 因子探测分析

利用因子探测分析包括自然因素和人类活动在内的8个因子对黄河流域甘肃段FVC的影响,各驱动因子对植被覆盖变化的影响可以通过因子探测得出的 q 值来阐明。因子探测结果如图5所示,8个因子(X_1 为降水量, X_2 为温度, X_3 为土地利用转换类型, X_4 为高程, X_5 为土壤类型, X_6 为地貌, X_7 为植被类型, X_8 为人口密度)对FVC的变化均有极显著影响($p < 0.001$)。降水量、植被类型及土壤类型在各个年份对因变量FVC均表现出较强的解释力,其中降水量对FVC的影响最大,年均 q 值为0.694;其次

对FVC影响较大的因子是植被类型和土壤类型,年均 q 值分别为0.579、0.512。高程、土地利用转换类型、温度、地貌、人口密度的年均 q 值依次降低,分别为0.337、0.286、0.274、0.201、0.024。不同驱动因子在不同年份 q 值的变化具有一定的波动性。温度和DEM的 q 值呈下降趋势,其中温度从2005年的0.311降至2019年的0.120,对因变量FVC的解释力呈下降趋势;地貌和人口密度的 q 值基本稳定,其中人口密度在4个年份 q 值均为最小,基本稳定在0.020左右,对因变量FVC的解释力最低。土地利用转化类型 q 值从2005年的0.223增长至2019年的0.283,表明随着土地利用开发强度增强,土地利用转换类型对FVC的影响日益增强。综上所述,降水量是影响黄河流域甘肃段植被覆盖的主导因子,植被类型和土壤类型次之,人口密度影响最小。随着时间推移,土地利用转换类型对FVC的影响力逐渐增强。

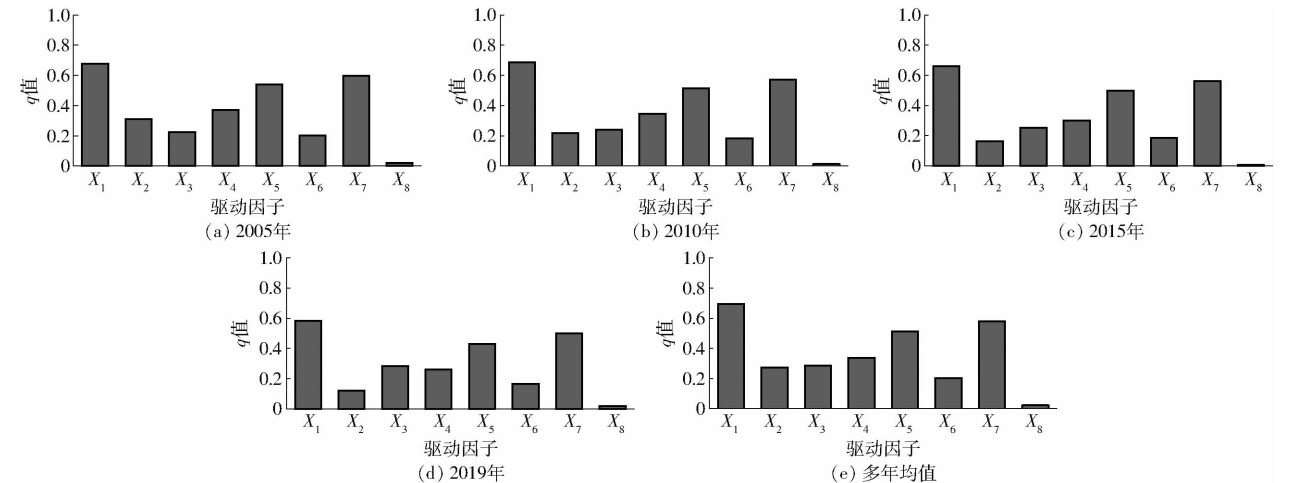


图5 各驱动因子解释力
Fig. 5 Explanatory power of each driving factor

2.4.2 交互探测分析

交互探测主要是用于评估两因子的共同作用是增强还是削弱对FVC的影响。图6为不同年份各驱动因子交互作用解释力,不同因子两两相互作用对FVC的影响均为增强。对比单因子探测结果,单一人口密度的影响较小,但其与其他因子交互作用时解释力明显增强。在不同年份,降水量与其他因子的交互作用对FVC的影响均为最强,如图6e所示,降水量与其他因子年均解释力均在0.7以上,分别为 $X_1 \cap X_3 (0.817) > X_1 \cap X_7 (0.800) > X_1 \cap X_2 (0.761) > X_1 \cap X_5 (0.752) > X_1 \cap X_4 (0.750) > X_1 \cap X_6 (0.745) > X_1 \cap X_8 (0.707)$ 。另外降水量和土地利用转换类型的交互作用在各年份的解释力均为最高,其次是降水量与植被类型。由此可见,降水量与土地利用转换类型、降水量与植被类型的交互

作用是黄河流域甘肃段植被覆盖的主导交互作用。另外土壤类型、植被类型与其他因子的交互作用对FVC的影响也较强,年均解释力均在0.5以上,由此也进一步说明了降水量、植被类型和土壤类型这3个因子对黄河流域甘肃段植被覆盖的影响最强。随着时间推移,不同因子间的交互作用 q 值,尤其是自然因子间的交互作用在波动中呈明显下降趋势,而土地利用转换类型与土壤类型及人口密度间的交互作用在波动中呈上升趋势,表明随着社会发展,人类活动在一定程度上对FVC的影响逐渐增强。

3 讨论

黄河流域甘肃段地形复杂且生态环境脆弱,是生态恢复的重点区域。本文分析了2001—2022年黄河流域甘肃段FVC的时空变化特征,研究表明近

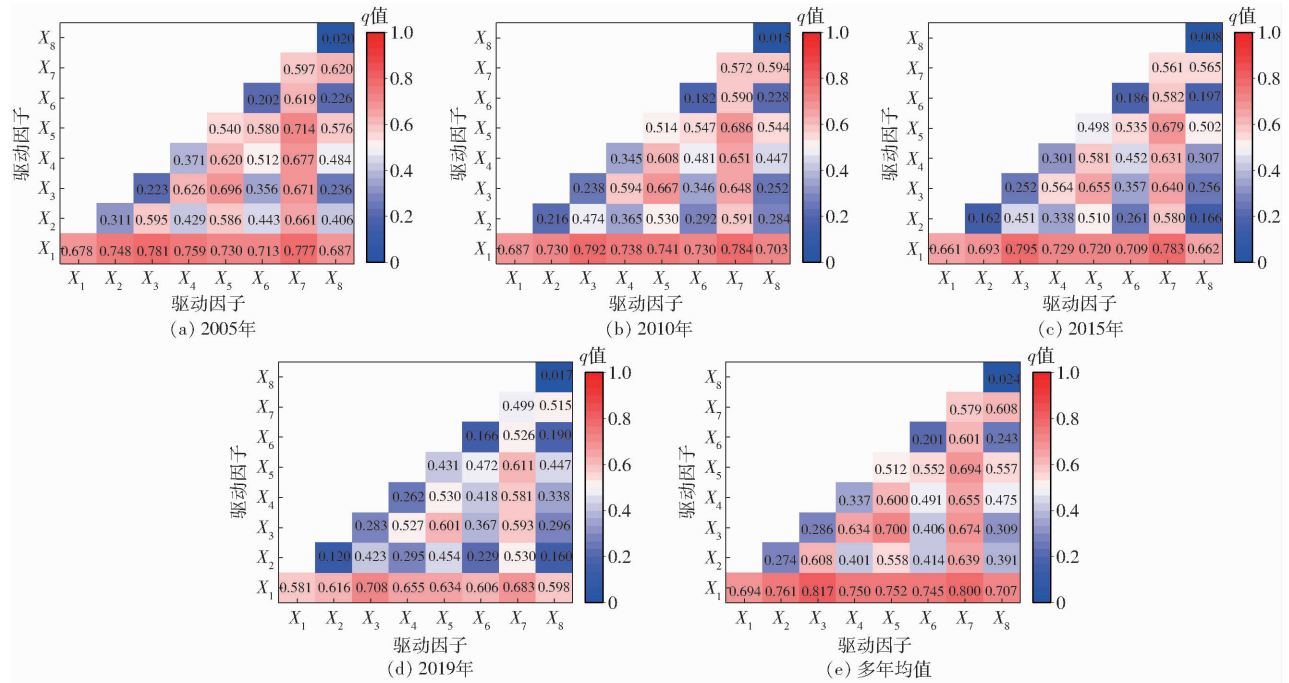


图 6 不同年份各驱动因子交互作用解释力
Fig. 6 Explanatory power of interaction of each driving factor

20 年来黄河流域甘肃段植被整体呈现改善的趋势，较高植被覆盖和高植被覆盖区域由东南向西北逐渐扩张，且植被增长区域主要集中于东南部，这与文献[13,22-23]研究结果基本一致。在空间分布上，黄河流域甘肃段 FVC 空间分布存在明显差异，整体上呈现“西高东低、南高北低”的分布趋势。高植被覆盖和较高植被覆盖区域主要集中分布在流域南部的甘南高原区和陇南山地。这是由于甘南高原区植被主要以高寒草甸、山地森林为主^[24]，且该区域降水丰富，因此 FVC 较高。而陇南山地位于秦巴山区、黄土高原以及青藏高原交界地带，气候温暖湿润，雨热同期有利于植被生长^[25]。低植被覆盖和较低植被覆盖区域主要集中分布在流域北部的陇中黄土高原区域，包括白银市、兰州市、定西市、庆阳北部等区域。这主要是由于这些区域降水少且蒸发量大，土地干旱贫瘠不利于植被生长，且该区域植被主要以荒漠和草原为主^[26]，因此 FVC 较低。

通过对长时间序列植被的波动性分析，发现黄河流域甘肃段 FVC 的 CV 空间分布与 FVC 空间分布趋势大致相同。甘南高原区和陇南山地区植被波动性较低，这可能由于该区域 FVC 较高，水土保持能力较好，因此稳定性较高，这与张军等^[27]研究结果基本一致。相反陇中黄土高原区 FVC 较低且生态较为脆弱，生态修复较为困难，因此波动性较高。同时，本文基于 Hurst 指数分析了研究区 FVC 变化趋势的可持续性，发现黄河流域甘肃段 FVC 整体上呈现反持续性。Hurst 指数已被证明在确定植被变

化趋势的可持续性方面更为准确^[28]，因此本研究具有一定的可靠性。植被变化受自然因素和人类活动共同影响^[29]，本文基于地理探测器方法对选取的 8 个指标进行分析，发现降水量、植被类型和土壤类型是黄河流域甘肃段植被变化的主导因子。同时发现大部分区域 FVC 与温度关系不显著，与降水量呈正相关，且与降水量呈显著正相关的区域集中于中部干旱半干旱区，这与 FENG 等^[30]研究结论一致，同时也进一步验证了地理探测器的结果。

影响植被变化的因素十分复杂，本研究仅选取部分人类活动和自然因素指标进行分析，存在一定局限性，后续研究还可以进一步结合光照、湿度、生态修复工程等指标做更全面的分析讨论。

4 结论

(1) 2001—2022 年黄河流域甘肃段 FVC 在波动中呈上升趋势，较高植被覆盖和高植被覆盖区域逐渐北移，植被生长呈向好趋势，在空间分布上整体呈“西高东低、南高北低”的分布趋势。

(2) 近 20 年间黄河流域甘肃段近 1/2 区域具有相对高-高波动性，主要集中分布在流域北部的黄土高原区，包括兰州市、白银市、定西市北部、临夏回族自治州北部和庆阳市北部区域。中波动性、相对低-低波动性主要分布在甘南高原区和陇南山地等区域。

(3) Sen + Mann - Kendall 趋势分析表明，2001—2022 年黄河流域甘肃段大部分地区植被呈

现改善趋势,其中轻微增长和显著增长区域占比 40.69%,轻微退化和显著退化区域占比 20.38%。黄河流域甘肃段 FVC 的 Hurst 指数平均值为 0.47,未来植被变化将呈现反持续性。

(4)驱动力分析表明降水量、植被类型和土壤类型对黄河流域甘肃段植被覆盖的影响最强。降水

量与土地利用转换类型、降水量与植被类型的交互作用是黄河流域甘肃段植被覆盖的主导交互作用。且随着时间变化,自然因子间的交互作用在波动中呈下降趋势,而人文因子交互作用在波动中呈上升趋势,表明随着社会发展,人类活动在一定程度上对 FVC 的影响逐渐增强。

参 考 文 献

[1] ROERINK G J, MENENTI M, SOEPBOER W, et al. Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003,28(1-3):103-109.

[2] 陆茵,张强,李晓红,等.黄河流域甘肃段植被覆盖度时空变化及对气候因子的响应[J].*水土保持通报*,2020,40(2):232-238.
LU Yin,ZHANG Qiang,LI Xiaohong, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage and its response to climate factors in Gansu section of Yellow River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(2):232-238. (in Chinese)

[3] 张斯琦,陈辉,宋明华,等.2000—2015 年柴达木盆地植被时空变化及其与环境因子的关系[J].*干旱区地理*,2019,42(5):1124-1132.
ZHANG Siqi,CHEN Hui,SONG Minghua, et al. Spatial and temporal variation of fractional vegetation cover and its relationship with environmental factors in the Qaidam Basin during 2000—2015[J]. *Arid Land Geography*, 2019,42(5):1124-1132. (in Chinese)

[4] 赵胜楠,王宇,乔旭宁,等.1987—2021 年淮河流域 FVC 时空变化与驱动因素分析[J].*农业机械学报*,2023,54(4):180-190.
ZHAO Shengnan,WANG Yu,QIAO Xuning, et al. Spatiotemporal variation and driving factors for FVC in Huaihe River Basin from 1987 to 2021[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023,54(4):180-190. (in Chinese)

[5] 王祎宸,贺洁,何亮,等.黄河流域 2001—2020 年植被物候及其对气候变化的响应[J].*生态学报*,2024,44(2):1-14.
WANG Yichen, HE Jie, HE Liang, et al. Vegetation phenology and its response to climate change in the Yellow River Basin from 2001 to 2020[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(2):1-14. (in Chinese)

[6] CHEN W, BAI S, ZHAO H, et al. Spatiotemporal analysis and potential impact factors of vegetation variation in the Karst region of Southwest China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021,28(43):61258-61273.

[7] WANG H, LIU G, LI Z, et al. Analysis of the driving forces in vegetation variation in the Grain for Green Program Region, China[J]. *Sustainability*, 2017,9(10):1853.

[8] 燕丹妮,武心悦,王博恒,等.1982—2015 年黄土高原植被变化特征及归因分析[J].*生态学报*,2023,43(23):1-11.
YAN Danni,WU Xinyue,WANG Boheng, et al. Characteristics and driving forces of changes in vegetation coverage on the Loess Plateau, 1982—2015[J]. *Acha Ecologica Sinica*, 2023,43(23):1-11. (in Chinese)

[9] 李雪银,张志强,孙爱芝.1982—2021 年黄河流域植被覆盖时空演变及影响因素研究[J].*地球环境学报*,2022,13(4):428-436.
LI Xueyin, ZHANG Zhiqiang, SUN Aizhi. Study on the spatial-temporal evolution and influence factors of vegetation coverage in the Yellow River Basin during 1982—2021[J]. *Journal of Earth Environment*, 2022,13(4):428-436. (in Chinese)

[10] 田智慧,任祖光,魏海涛.2000—2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制[J].*环境科学*,2022,43(2):743-751.
TIAN Zhihui,REN Zuguang,WEI Haitao. Driving mechanism of the spatiotemporal evolution of vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2022,43(2):743-751. (in Chinese)

[11] 岳萌,耿广坡,王涛,等.2000—2019 年黄河流域陕西段植被 NDVI 时空变化及其驱动因素分析[J].*水土保持研究*, 2023,30(2):238-246.
YUE Meng,GENG Guangpo,WANG Tao, et al. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and its driving factors in the Shanxi section of the Yellow River Basin from 2000 to 2019[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):238-246. (in Chinese)

[12] 张瑾,王斌,白建军.基于植被状态指数的甘肃省 2000—2019 年干旱时空特征分析[J].*水土保持研究*,2022,29(6):167-182.
ZHANG Jin,WANG Bin,BAI Jianjun. Analysis of the spatial and temporal characteristics of drought in Gansu Province from 2000 to 2019 based on the vegetation state index[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(6):167-182. (in Chinese)

[13] LIU Y, GUO B, LU M, et al. Quantitative distinction of the relative actions of climate change and human activities on vegetation evolution in the Yellow River Basin of China during 1981-2019[J]. *Journal of Arid Land*, 2022,15(1):91-108.

[14] ZHAI L,FENG Q. Spatial and temporal pattern of precipitation and drought in Gansu Province, Northwest China[J]. *Natural Hazards*, 2008,49(1):1-24.

[15] LIU R, LIU Y,LIU J Y. Research progress of MODIS scientific data processing[J]. *Progress in Natural Science*, 2009,19(2):141-147.

[16] YANG J,HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(8):3907-3925.

[21] HOANG H M, AKERMA M, MELLOULI N, et al. Development of deep learning artificial neural networks models to predict temperature and power demand variation for demand response application in cold storage [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 131: 857 – 873.

[22] NIE Y, NGUYEN N H, SINTHONG P, et al. A time series is worth 64 words: long-term forecasting with transformers[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2211. 14730, 2022.

[23] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, 30: 5998 – 6008.

[24] HAN L, YE H J, ZHAN D C. The capacity and robustness trade-off: revisiting the channel independent strategy for multivariate time series forecasting[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2304. 05206, 2023.

[25] DAS A, KONG W, LEACH A, et al. Long-term forecasting with TiDE: time-series dense encoder[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2304. 08424, 2023.

(上接第 372 页)

[17] 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 Miaomiao, WU Bingfang, YAN Changzhen, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun reservoir by remote sensing[J]. *Resources Science*, 2004, 26(4): 153 – 159. (in Chinese)

[18] MILICH L, WEISS E. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: ground truth sampling of the Sahel along north-south transects[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 21(2): 235 – 260.

[19] LIU H, JIAO F, YIN J, et al. Nonlinear relationship of vegetation greening with nature and human factors and its forecast—a case study of Southwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106009.

[20] ZHU L, MENG J, ZHU L. Applying Geodetector to disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 12.

[21] WANG J, LI X, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107 – 127.

[22] 孙高鹏,刘宪锋,王小红,等. 2001—2020 年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 205 – 212.
SUN Gaopeng, LIU Xianfeng, WANG Xiaohong, et al. Changes in vegetation coverage and its influencing factors across the Yellow River Basin during 2001—2020 [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(4): 205 – 212. (in Chinese)

[23] 张乐艺,李霞,冯京辉,等. 2000—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(5): 276 – 286.
ZHANG Leyi, LI Xia, FENG Jinghui, et al. Spatial-temporal changes of NDVI in Yellow River Basin and its dual response to climate change and human activities during 2000—2018[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(5): 276 – 286. (in Chinese)

[24] 王兴丽,蒋友严,张翼飞,等. 2001—2020 年甘南高原植被变化特征及驱动因素[J]. *草业科学*, 2023, 40(9): 2185 – 2198.
WANG Xingli, JIANG Youyan, ZHANG Yifei, et al. Characteristics and driving factors of vegetation changes in the Gannan Plateau from 2001 to 2020[J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(9): 2185 – 2198. (in Chinese)

[25] 张波,牟建新,徐璐,等. 基于 MODIS EVI 的陇南山地植被覆盖时空变化[J]. *中国农业通报*, 2017, 33(26): 70 – 77.
ZHANG Bo, MU Jianxin, XU Lu, et al. Spatial and temporal variation of vegetation coverage in mountain area of Longnan based on MODIS EVI[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(26): 70 – 77. (in Chinese)

[26] 王雄,张翀,李强. 黄土高原植被覆盖与水热时空通径分析[J]. *生态学报*, 2023, 43(2): 719 – 730.
WANG Xiong, ZHANG Chong, LI Qiang. Path analysis between veretation coverage and climate factos in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2): 719 – 730. (in Chinese)

[27] 张军,陶华旻,李文杰,等. 甘肃省草地生态系统时空变化特征[J]. *草业科学*, 2022, 39(6): 1106 – 1114.
ZHANG Jun, TAO Huayang, LI Wenjie, et al. Spatial change of grassland ecosystem in Gansu Province[J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(6): 1106 – 1114. (in Chinese)

[28] JIANG W, YUAN L, WANG W, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117 – 126.

[29] 王力,赵思妍,陈元鹏,等. 基于 GEE 云平台的黄土高原生态修复区植被变化与归因[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(3): 210 – 223.
WANG Li, ZHAO Siyan, CHEN Yuanpeng, et al. Vegetation change and attribution in ecological restoration area of Loess Plateau based on GEE cloud platform[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(3): 210 – 223. (in Chinese)

[30] FENG X, TIAN J, WANG Y, et al. Spatio-temporal variation and climatic driving factors of vegetation coverage in the Yellow River Basin from 2001 to 2020 based on kNDVI[J]. *Forests*, 2023, 14(3): 620 – 633.