

DOI: 10.20103/j.stxb.202305311158

治兆霞, 张洪波, 杨志芳, 张雨柔, 李同方, 赵孝威, 薛超伟. 陕北黄土高原气象要素对植被覆盖的空间分异影响及风险探测. 生态学报, 2024, 44(6): 2379-2395.

Ye Z X, Zhang H B, Yang Z F, Zhang Y R, Li T F, Zhao X W, Xue C W. Spatial differentiation effects and risk detection of meteorological elements to vegetation cover on the Loess Plateau of northern Shaanxi. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2379-2395.

陕北黄土高原气象要素对植被覆盖的空间分异影响及风险探测

治兆霞¹, 张洪波^{1,2,3,*}, 杨志芳¹, 张雨柔¹, 李同方¹, 赵孝威¹, 薛超伟¹

1 长安大学水利与环境学院, 西安 710054

2 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054

3 水利部旱区生态水文与水安全重点实验室, 西安 710054

摘要: 陕北黄土高原地处我国西北生态环境脆弱区, 近年来受退耕还林(草)影响, 区域植被覆盖变化显著, 与气象要素的响应关系也呈现出了复杂的空间分异性和不确定性, 亟待厘清。以不同地貌分区为响应单元, 探究了陕北黄土高原变绿前后(1982—1992年与2005—2015年)NDVI指数的时空演化特征, 分析了植被覆盖变化与气象要素之间的分异性响应关系, 并透过最优参数的地理探测器模型(OPGD)探测了气象要素变化对植被覆盖演变的交互影响及风险。研究结果表明:(1)陕北黄土高原及各地貌分区在研究期内NDVI指数均呈显著上升趋势, 且阶段化分异明显; 各地貌区气温和实际蒸散发量在高原变绿前后趋势变化差异明显, 1982—1992年主要呈不显著增加趋势, 而2005—2015年则表现为不显著减少趋势; 两个时期降水量的空间异质性较为显著, 其中北部地区为持续增加趋势, 而南部地区则由减少逆转为增加趋势。(2)不同地貌区NDVI指数与气温和蒸散发均呈正相关, 且蒸散发与NDVI的相关性强于气温; 相对高原变绿前, 2005—2015年NDVI指数对各气象要素的响应强度均有所增大。(3)OPGD因子检测结果显示5km空间网格是评价气候变化对陕北黄土高原植被覆盖变化影响的最佳空间尺度, 各地貌分区对NDVI指数变化影响最大的气象因子依次为: 气温(黄土塬)、降水(盖沙黄土丘陵)、蒸散发(黄土峁状丘陵)、降水(黄土梁状丘陵)、降水(黄土宽谷丘陵)、蒸散发(风沙丘陵)、降水(土石丘陵); 交互探测表明气象因子间的交互作用对NDVI指数的空间分异具有协同增强性, 但不同时期各地貌区的主导交互因子略有差异。(4)风险探测发现不同实际蒸散发量对NDVI指数的影响有显著空间差异。(5)陕北黄土高原的植被覆盖变化并不能简单归因于退耕还林(草)等生态修复措施, 而应是多要素耦合驱动的结果, 气象要素在其中扮演了不可忽视的作用。

关键词: NDVI; 时空演化; 气候影响; 最优参数地理探测器; 陕北黄土高原

Spatial differentiation effects and risk detection of meteorological elements to vegetation cover on the Loess Plateau of northern Shaanxi

YE Zhaoxia¹, ZHANG Hongbo^{1,2,3,*}, YANG Zhifang¹, ZHANG Yurou¹, LI Tongfang¹, ZHAO Xiaowei¹, XUE Chaowei¹

1 School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China

3 Key Laboratory of Eco-hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions of Ministry of Water Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: The Loess Plateau in northern Shaanxi is located in the ecologically vulnerable region of northwest China. In

基金项目: 国家自然科学基金(51979005); 中央高校基本科研业务费专项资金(300102293201)

收稿日期: 2023-05-31; 网络出版日期: 2023-12-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hbzhang@chd.edu.cn

recent years, affected by the return of farmland to forestry (grassland), the regional vegetation cover has changed significantly, and the response relationship with meteorological elements has also exhibited complex spatial differentiation and uncertainty, which urgently needs to be clarified. Taking different geomorphic regions as response units, this study investigated the spatiotemporal evolution characteristics of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) before and after the greening (1982—1992 and 2005—2015) of the Loess Plateau in northern Shaanxi, analyzed the differential response relationship between vegetation cover changes and meteorological elements, and explored the interaction effects and risks of meteorological elements changes on vegetation cover evolution through the optimal parameters-based geographical detector (OPGD) model. The results showed that: (1) the NDVI of the Loess Plateau in northern Shaanxi and each geomorphic subdivision presented a significant upward trend during the statistical period, with significantly phased differentiation. The trends in temperature and evapotranspiration in different geomorphic regions showed significant differences before and after the greening of the plateau, with a mainly non-significant increasing trend from 1982 to 1992 and a non-significant decreasing trend from 2005 to 2015. The spatial heterogeneity of precipitation was more significant during the two periods, with the northern region showing a continuously increasing trend, while the southern region reversed from a decreasing trend to an increasing trend. (2) The NDVI of different geomorphic regions was positively correlated with temperature and evapotranspiration, and the correlation between evapotranspiration and NDVI was stronger than that between temperature and NDVI. Compared with the pre-greening period, the response intensity of the NDVI to various meteorological elements increased from 2005 to 2015. (3) The OPGD factor detection results showed that a 5km spatial grid was the optimally spatial scale for evaluating the impact of climate change on vegetation cover change on the Loess Plateau in northern Shaanxi. The meteorological factors that had the greatest impact on the NDVI in different geomorphic regions were in order: temperature (Loess tableland), precipitation (Cover sand loess hills), evapotranspiration (Loess hilly mounds), precipitation (Loess beam hills), precipitation (Loess wide valley hills), evapotranspiration (Wind-sand hills), and precipitation (Soil-stone hills). The interactive detection showed that the interaction between the meteorological factors had a synergistic enhancement effect on the spatial differentiation of the NDVI, but the dominant interaction factors in different geomorphic regions differed slightly at different times. (4) The risk detection found significantly spatial differences in the influence of different evapotranspiration amounts on the NDVI. (5) The change in vegetation cover on the Loess Plateau in northern Shaanxi could not simply be attributed to ecological restoration measures such as the return of farmland to forestry (grass) but should be the result of a coupling of multiple factors, in which meteorological elements played a non-negligible role.

Key Words: Normalized Difference Vegetation Index; spatiotemporal evolution; climate effect; optimal parameters-based geographical detector; Loess Plateau of northern Shaanxi

随着全球气候变化及人类活动的加剧,很多国家或地区的陆地生态系统与社会经济发展正在遭受严重威胁,而气候变化与陆地生态系统之间的响应关系也逐步成为学界和国际社会关注的热点问题^[1—2]。地表植被作为陆地生态系统的核心组成部分,不仅在水热交换、气候调节、维持地表能量平衡等方面发挥着至关重要的作用,且对气候变化也极为敏感,常被描述为区域生态环境发展状况的关键指示器^[3]。目前,净初级生产力(Net Primary Production, NPP)^[4]、植被覆盖度(Fraction Vegetation Coverage, FVC)^[5]、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)^[6]等指标常被用于表征区域的植被覆盖与生长状况。其中,NPP指植物在单位时间、单位面积上由光合作用产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分,主要用于反映植物固定和转化光合作用产物的效率以及植物群落的碳汇能力。在区域尺度上,一般可基于MODIS-NDVI数据、土地覆盖分类数据、气象数据借助CASA模型等来进行估算^[7],但对城市、盐碱地、内陆淡水或一些植被贫瘠区常无法实现^[4]。FVC指植被冠层在地面的垂直投影面积与观测区总面积的比值,可反映植被

的茂密程度及植物光合作用面积的大小,是表征地表植被群落生长态势的综合量化指标。一般可通过基于NDVI的像元二分模型进行估算,并可实现与NDVI相同的高时空分辨率^[8]。不过FVC在估算过程中常涉及NDVI_{max}和NDVI_{min}的经验选取,极易引发一定的不确定性或信息损失。NDVI是目前植被覆盖度遥感估算方法中最常见、最经典的植被指数,其凭借与(对)生物物理特征和生物化学变量(如植被覆盖度、叶面积指数、叶绿素含量、绿量和生长条件等)的良好相关性或敏感性,而被广泛用于描述大尺度、长序列的地表植被动态与生长状况^[6]。

目前,国内外学者对植被覆盖变化与气象要素的响应关系开展了较为深入的研究^[9-10],并主要从区域尺度探索了植被覆盖变化的时空演变规律及其归因。如Lamchin等^[11]研究表明气温对亚洲地区的植被变化起主导作用;赵明伟等^[12]基于中国陆地NDVI遥感数据,揭示了降水是驱动西北大部分区域植被变化的关键因子;雷茜等^[13]基于不同生态系统区探究了中国陆地区域植被与气象要素间的响应机制,发现不同生态系统下二者的响应关系存在时空差异。以上研究表明,不同空间尺度、不同生态系统的差异性都可能诱发植被变化与气象要素的响应关系表现出空间异质性,精细化探索植被覆盖变化与气象要素的协同演化规律就显得尤为必要。在文献梳理过程中,可发现现有研究成果多聚焦于大区域尺度,而对同一区域(如黄土高原)内不同典型地貌类型对植被覆盖与气象要素协同关系的影响研究则鲜有涉及。此外,研究也发现当前有关植被覆盖变化与气象要素的响应研究多聚焦于单向的驱动作用,即气象要素对植被覆盖变化的影响^[14],或植被覆盖变化所引起的微气候特征^[15],常忽略不同气象要素如何协同作用于植被覆盖变化,而这可能会影响人们对植被覆盖变化与气象要素响应关系的科学认识,导致区域生态修复建设效果有所偏差。因此,深度聚焦区域的植被覆盖变化及其与气象要素的响应机制,探明其在气候变化与土地利用转型过程中所衍生的空间分异性与不确定性,对掌握区域植被覆盖变化的时空特征及潜在发展趋势,保障区域生态安全与高质量发展尤为关键。

陕北黄土高原位于黄土高原中部,独特的地理位置与环境条件使其一直承担着生态环境脆弱和对气候变化高度敏感的双重压力^[16],加之持续的土地开垦和过度开发,区域生态安全岌岌可危。为了改善黄土高原生态环境,1999年国家开始在陕北高原实施了大规模的退耕还林(草)、天然林保护、三北防护林建设等生态保护工程(以下简称退耕还林(草)),使区域植被覆盖的整体状况得到了明显提升^[17]。然而,由于陕北黄土高原的生态修复与环境综合治理相对分散,也催生了陕北黄土高原植被覆盖变化的空间分异性,进一步致使区域气候变化与生态系统的响应关系趋于复杂性与多元性,并成为当前黄土高原水文效应研究所面临的重要挑战^[18]。

鉴于此,本文拟重点聚焦于陕北黄土高原不同地貌分区,选取气温、降水和实际蒸散发作为典型的气象驱动因子,重点解析不同地貌分区植被覆盖的演化特征及其与气象要素的响应关系,并基于最优参数的地理探测器模型(Optimal parameters-based geographical detector,OPGD),进一步探讨陕北黄土高原变绿前后各气象要素对植被覆盖变化的解释力,评估其潜在风险,以期为气候变化影响下陕北黄土高原区乃至整个黄土高原的生态系统服务优化和区域高质量发展提供重要参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

陕北黄土高原地处黄土高原核心地带,位于107°15'—111°14'E,35°04'—39°15'N之间,主要包含榆林、延安两个地级市,25个县区,总面积为9.25×10⁴km²。地势西北高、东南低,榆林以北多为风沙区,中部主要为黄土梁峁区,延安以南为中低山夹黄土塬^[19]。区域水土流失极为严重,是我国乃至全球的典型生态脆弱区和气候变化敏感区。

陕北黄土高原属于暖温带大陆性季风湿润气候向内陆干旱气候的过渡区,年平均温度约为8—12℃,年均降水量约为350—600mm,年蒸发量变化在1000mm左右。受地理位置、高程变化及植被覆盖的空间格局影响,陕北黄土高原的气温、降水及蒸散发等气象要素的分布具有明显的空间异质性^[20]。参考黄土高原的地

理分区(<http://www.geodata.cn>)，并考虑本文研究需要，将陕北黄土高原细划为黄土塬、盖沙黄土丘陵、黄土峁状丘陵、黄土梁状丘陵、黄土宽谷丘陵、风沙丘陵和土石丘陵7个地貌分区，具体如图1所示。

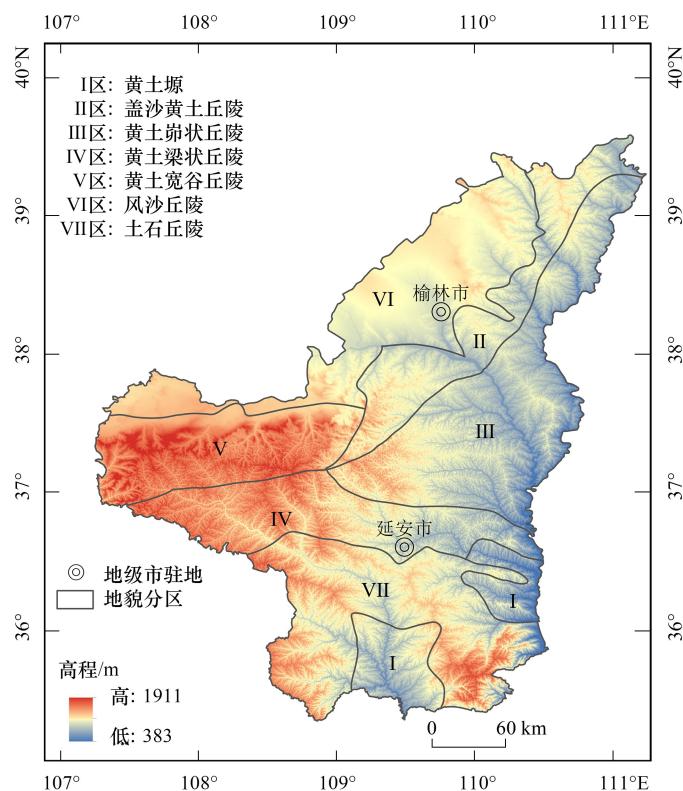


图1 研究区地貌分区

Fig.1 Geomorphological zonation of the study area

1.2 数据来源及处理方法

NDVI数据来源于GIMMS NDVI3g v1.0数据集，空间分辨率8 km，时间分辨率15 d。使用R语言程序包进行月最大值合成(MVC)^[21]，空间参考为WGS84，得到1982—2015年的月最大值合成数据，最后对逐月栅格数据集进行最大值合成，得到年尺度NDVI数据。

气象数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)提供的中国1 km分辨率逐月降水量数据集(1901—2021)、中国1 km分辨率逐月平均气温数据集(1901—2021)。实际蒸散发量数据来源于国家青藏高原科学数据中心提供的逐月中国陆地实际蒸散发数据集(1982—2017)，空间分辨率为0.1°。所有数据均采用双线性插值法进行重采样至1 km，且重投影与NDVI一致。

黄土高原地理分区数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心—黄土高原分中心(<http://www.geodata.cn>)提供的黄土高原地区地理分区图(2000年)。

土地利用数据来源于武汉大学杨杰、黄昕教授基于Landsat数据提取的1980—2020年中国30 m分辨率逐年土地覆盖数据集^[22]。

考虑到数据来源所覆盖时期的时间差异，本文主要将研究期设定在1982—2015年，其中1982—1992年为基准期，表征黄土高原变绿前的植被覆盖状态与水文气象条件，而2005—2015年为变化期，主要反映黄土高原变绿后植被覆盖状态与水文气象条件。本文中，采用的NDVI数据、气象数据、实际蒸散发量数据为1982—2015年，土地利用数据考虑到数据的连续性要求，选用了1992—2015年。

2 研究方法

2.1 Theil-Sen Median 趋势分析法及 Mann-Kendall 检验法

采用 Theil-Sen Median 趋势分析法及 Mann-Kendall 检验法,对不同地貌分区的 NDVI 以及同一分区的气象要素时间序列进行逐像元趋势分析和显著性检验。已有研究表明^[23],这两种方法结合可有效减少测量误差和离群数据对统计结果的影响。

Theil-Sen Median 趋势分析法:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times x_i - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中:Slope 表示单个像元回归方程的斜率;n 表示年尺度时间序列长度($n = 34$); x_i 表示第 i 年的平均值。Slope>0 表示时间序列呈现上升趋势;Slope<0 表示时间序列呈现下降趋势。

Mann-Kendall 检验法:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, n 表示年尺度时间序列总长; x_j 和 x_i 分别表示第 j 年和第 i 年的平均值; $\text{sgn}(x_j - x_i)$ 表示符号函数; Z 表示检验统计量,当显著性水平 α 一定时,若有 $|Z| \geq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 成立,则说明该趋势显著。

采用 ArcGIS 的重分类及叠加分析工具,结合 Slope 值及 Z 值计算结果,将各因子的时间序列变化趋势划分为五个等级,包括显著增加/减少、不显著增加/减少、稳定不变(表 1)。

表 1 时间序列趋势变化等级

Table 1 Time series trend change levels

$ Z $	斜率 Slope	趋势 Trend	$ Z $	斜率 Slope	趋势 Trend
>1.96	> 0.5‰	显著增加	≤ 1.96	$\geq 0.5‰$	不显著增加
	-0.5‰—0.5‰	稳定不变		-0.5‰—0.5‰	稳定不变
	< -0.5‰	显著减少		$\leq -0.5‰$	不显著减少

Z:检验统计量

2.2 Pearson 相关系数法

利用 Pearson 相关系数法分别对整个研究区及不同地貌分区的月尺度 NDVI 指数与相应气象数据进行统计分析,计算相关系数 r ,并进行显著性检验。所采用的公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

式中, N 表示月尺度时间序列长度; i 和 j 表示时间; X_i 和 Y_i 分别表示 i 时间 NDVI 值和相应的气象因子值; \bar{X} 和 \bar{Y} 分别表示 NDVI 均值和气象因子均值。

2.3 基于最优参数的地理探测器模型

地理探测器是一种基于空间方差分析的检验某种地理现象及其潜在驱动因子之间关系的空间统计学方法,已被广泛用于量化驱动因子对地理现象的影响效果^[24]。然而研究表明^[25],在地理空间分析中普遍存在一种可修改面积单位问题(The modifiable areal unit problem, MAUP),即不同的变量离散方法和空间统计单元会对计算结果产生较大影响(分区效应和尺度效应)。为了解决这个问题,Song 等^[26]对地理探测器进行了完善与改进,提出了一种基于最优参数的地理探测器(Optimal parameters-based geographical detector, OPGD)模型,并用于空间异质性分析。本文主要采用 OPGD 模型中的四个主要模块:因子探测器、参数优化、交互探测器和风险探测器,对气象要素与 NDVI 指数变化之间的关系进行全面解析。

(1) 因子探测器

因子检测器作为地理检测器的核心部分,可以确定潜在驱动因子多大程度上解释了因变量的空间分异,一般用 q 统计量来表示,其计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^m N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中, $h = 1, \dots, m$ 代表 NDVI 和气象要素的分层; N_h 和 N 分别代表 h 层和整个区域的格点数; σ_h^2 和 σ^2 分别表示 h 层和整个区域 NDVI 指数的方差。 q 的取值范围为 [0—1], q 值越接近 1 说明 NDVI 指数的空间分异性越明显且该气象要素对 NDVI 指数的解释力越大。

(2) 参数优化

参数优化分为变量离散化参数优化和空间尺度优化。一般确定最优离散化参数可通过 R 语言中的 GD 包,运用相等间隔(equal)、自然间断点(natural)、分位数(quantile)、几何间隔(geometric)和标准差(sd)分类方法,间断点个数设为 4—10 类,并将因子探测器计算得到的 q 统计值最大的参数组合作为最优离散化参数^[27]。

空间尺度优化是为了减少不同尺度计算时的结果差异,确定空间分析时的最优空间尺度。根据数据的分辨率和各地貌分区的覆盖范围,分别选择 6 种不同的空间尺度,比较不同空间尺度下具有各自最优空间离散化参数的各驱动因子的 q 统计值,当所有驱动因子 q 值的 90% 分位数达到最大值时,即为选择的最优空间尺度。

(3) 交互探测器

交互探测器通过比较两个单一潜在驱动因子 X_1 和 X_2 单独作用和共同作用时的 q 统计量,来判断两因子共同作用时是否会增加或减弱对 NDVI 指数的解释力。交互作用包括五种类型,具体如表 2 所示。

表 2 两个潜在驱动因子对因变量交互作用的类型

Table 2 Type of interaction between two potential drivers on the dependent variable

q 值比较结果 q -value comparison results	交互作用类型 Type of interaction	q 值比较结果 q -value comparison results	交互作用类型 Type of interaction
$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强
$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强		

(4) 风险探测器

风险探测器一般用 t 统计量来分别比较各驱动因子在不同分区间间的因变量平均值是否存在显著差异,计算公式如下:

$$t_{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}} = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\sqrt{\left[\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}}} \quad (7)$$

式中: \bar{Y}_h 为分区 h 内的 NDVI 指数均值; n_h 为分区 h 内的格点总数, Var 为方差函数。令原假设为: $\bar{Y}_{h=1} = \bar{Y}_{h=2}$, 若在一定置信水平下假设不成立, 表明两个分区间 NDVI 指数平均值存在显著差异, 差异越大代表风险越大。

3 结果

3.1 NDVI 指数时间序列动态变化特征

3.1.1 时域演化趋势

在研究期(1982—2015 年)内,陕北黄土高原 NDVI 指数呈波动上升趋势(增速为 0.04/10a),且上升趋势阶段化分异明显,其中,基准期(1982—1992 年)为缓慢上升期,增速为 0.02/10a;变化期(2005—2015 年)为快速上升期,增速为 0.09/10a,约为基准期(退耕还林还草前)变化速率的 4 倍,如图 2 所示。同时,各地貌分区 NDVI 变化趋势与陕北黄土高原整体趋势相近,均呈显著上升趋势,趋势显著性 $P < 0.05$ 。其中,Ⅲ区 NDVI 增速最大,达 0.06/10a,说明该区域的植树造林具有显著成效,而Ⅶ区增速最小,只有 0.01/10a。

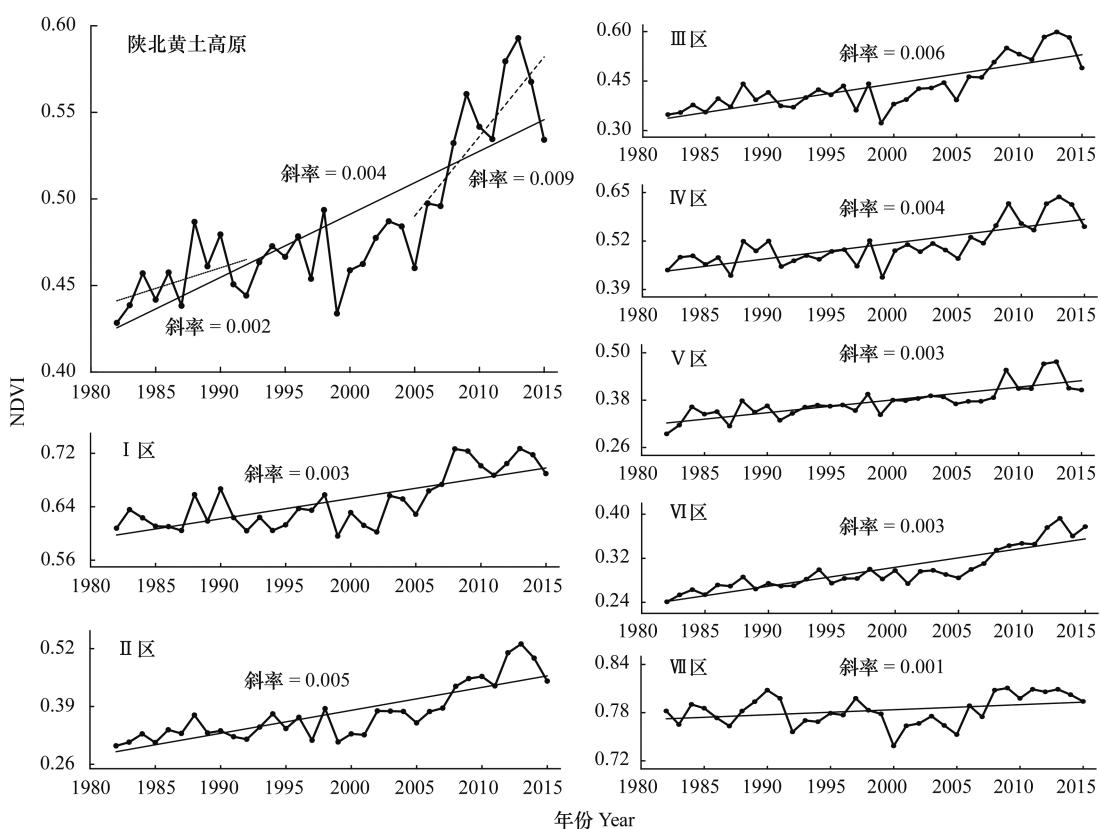


图 2 陕北黄土高原及各地貌分区 NDVI 指数的年际变化

Fig.2 Interannual variation of NDVI indices on the Loess Plateau of northern Shaanxi and in various geomorphological subdivisions

3.1.2 空间演化趋势

基准期内,陕北黄土高原 NDVI 指数整体呈增长趋势,且保有增长趋势的面积约占研究区总面积的 77.66%,其中以不显著增长($P > 0.05$)为主。研究还发现 NDVI 指数在不同地貌分区表现出了明显的差异性变化,如 I 区、II 区、IV 区和 VII 区的局部区域就呈现出显著的减少趋势,全域保有减少趋势的面积约占总面积的 11.42%(图 3)。

而变化期陕北黄土高原 NDVI 指数整体呈显著增加趋势($P < 0.05$),保有增加趋势的面积占研究区总面积的 93.84%,远大于减少趋势的面积占比(3.91%)。其中,以 II 区、III 区、IV 区和 VI 区 NDVI 指数变化最为强

烈,均表现出显著增加趋势,由此说明2005年后陕北黄土高原区植被覆盖状况得到明显改善,而这与1999年开始的大规模退耕还林还草工程不无关系。然而,统计结果也显示变化期陕北黄土高原的植被覆盖趋好具有全局性以及广泛的显著性,这与区域退耕还林还草所引发的分散性土地利用类型流转有所不同,究其原因可能与变化期降水偏丰等因素有关。与整体显著增加的趋势不同,南部I区和VII区内局部地区的NDVI指数仍然呈减少趋势,且相对分散,其中显著减少趋势面积约占减少趋势总面积的2.30%。究其原因,可发现该区域地势平坦,人口密集,植被易受人类活动影响,而城镇化进程的加快无疑加剧了植被退化,致使植被覆盖有所降低。

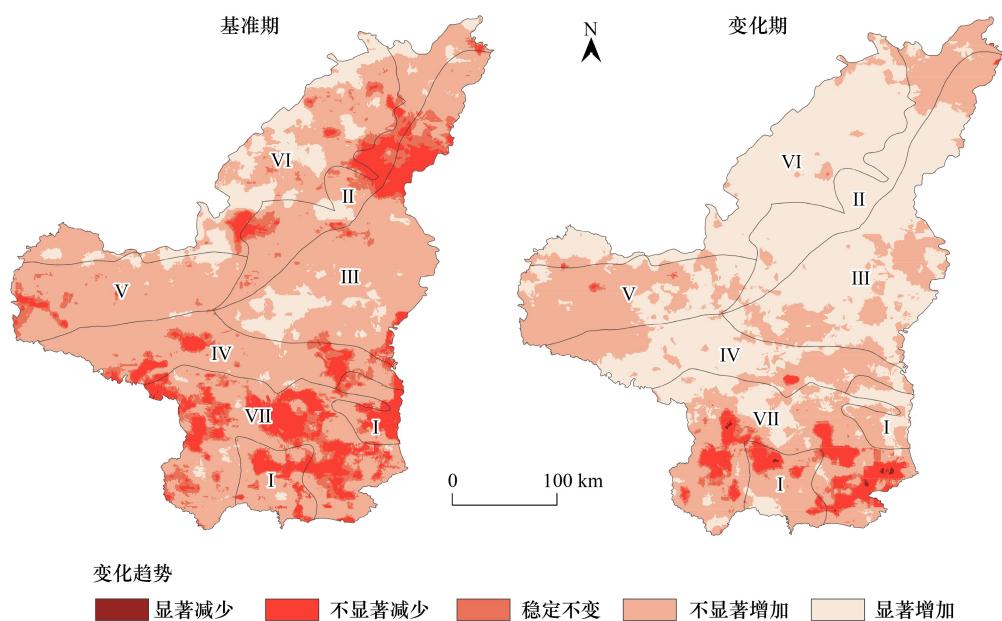


图3 陕北黄土高原不同地貌区NDVI指数变化趋势

Fig.3 Trends in NDVI in different geomorphological subdivisions of the Loess Plateau in northern Shaanxi

3.2 NDVI指数与气象要素的空间关联性

3.2.1 气象要素时间序列时空演变规律

(1)时域变化趋势

研究期内,陕北黄土高原区的气温总体呈现显著上升趋势($P<0.05$),上升速率约为 $0.04^{\circ}\text{C}/\text{a}$,即 $17.14\%/\text{a}$ 。在2005年前后,气温的变化趋势有转折,原有的快速上升趋势转为缓慢下降(图4)。各地貌分区气温变化趋势与整个研究区基本保持一致,均呈现显著上升趋势。其中,I区年平均气温高达 10.58°C ,明显高于其他地貌分区的平均水平。小提琴图显示了各气象要素年尺度数据在基准期及变化期的整体分布情况,上下限分别代表最高值与最低值,中线代表多年平均值。结合小提琴图,对比基准期和变化期的气温变化,可发现变化期多年平均气温显著高于基准期,与全球变暖的大体趋势保持一致。其中,I区多年平均气温高达 10.58°C ,明显高于其他地貌分区的平均水平。

降水量与实际蒸散发量在整个研究期内呈轻微上升趋势($P>0.05$),平均上升速率分别为 $0.79\text{mm}/\text{a}$ (即 $5.80\%/\text{a}$)和 $0.63\text{mm}/\text{a}$ (即 $3.64\%/\text{a}$)。其中,基准期和变化期的降水量均保持轻微上升趋势,而实际蒸散发量呈现先增后减的变化规律。结合小提琴图,可发现变化期降水量和实际蒸散发量的多年平均值均高于基准期。对比不同地貌分区,I区的多年平均年降水量最大,达 534.06mm ;而实际蒸散发量则是V区最大,可达 649.87mm ,其与年平均降水量及温度的高值区域并不重合,说明诱发陕北黄土高原实际蒸散发量变化的因素不仅局限于此,应系与其他要素的耦合作用所致。

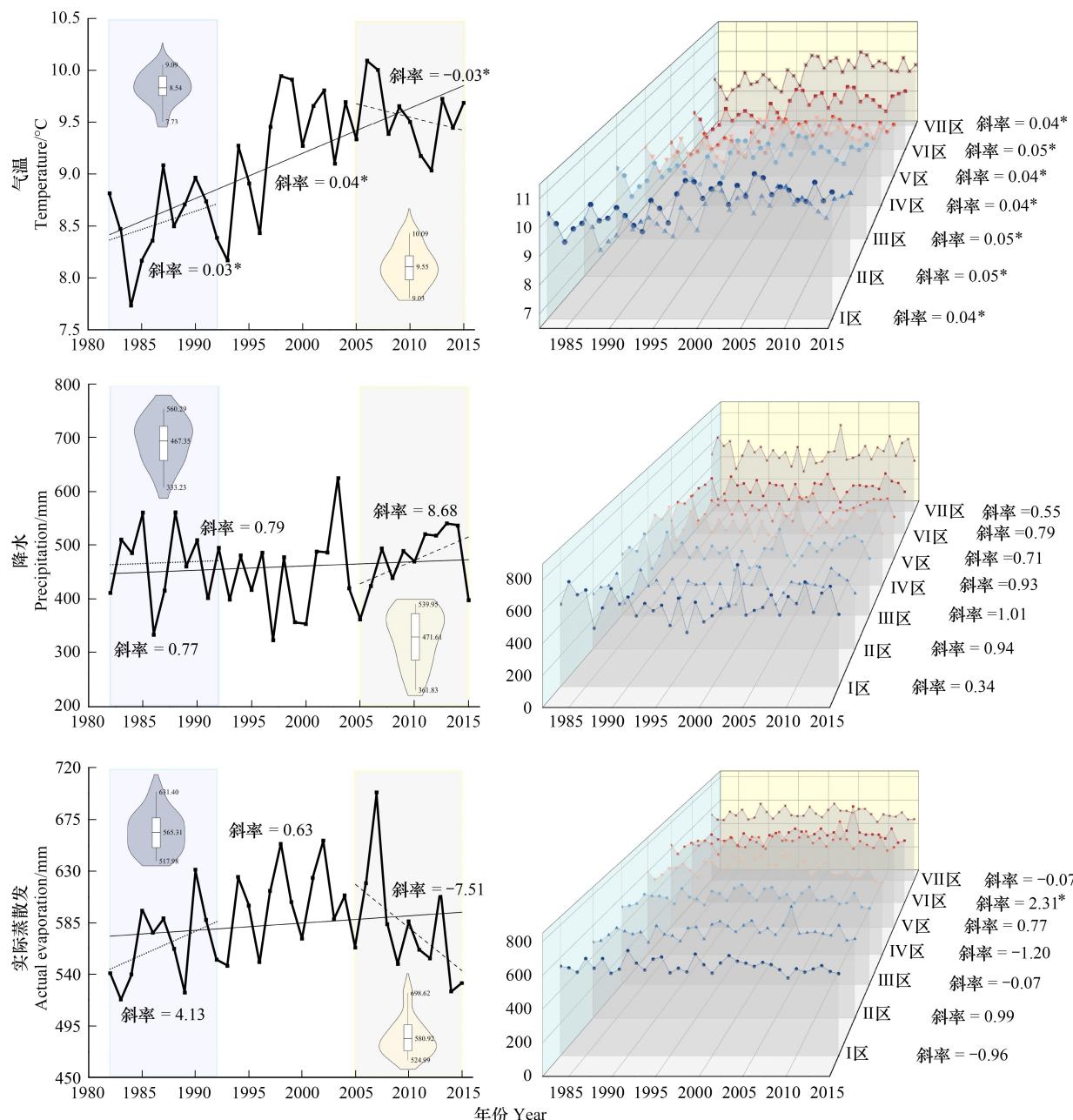


图 4 陕北黄土高原与各地貌分区气象要素年际变化

Fig.4 Interannual variation of meteorological elements on the Loess Plateau and various geomorphological subdivisions in northern Shaanxi

图中“*”表示趋势显著性 $P < 0.05$

(2) 空间演化格局

从不同地貌分区的变化来看,基准期陕北黄土高原各地貌区的气温均呈不显著的增加趋势($P > 0.05$),斜率变化处于 $0.8\text{--}7.3^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 之间。在陕北黄土高原北部,主要涉及II区、V区、VI区以及III区和IV区的部分区域,其降水量主要表现为不显著的增加趋势($P > 0.05$),覆盖区域约占总面积的39.66%;南部地区的降水量则呈不显著减少趋势($P > 0.05$),覆盖面积占总面积的60.28%,而保持稳定不变的区域面积仅占0.06%。实际蒸散发量也表现出了明显的空间异质性,其中I区、VI区、VII区的部分区域呈不显著的减少趋势($P > 0.05$),而其余地貌区则均为增加趋势,保有显著增加趋势的面积约占研究区总面积的3.17%(图5)。

变化期陕北黄土高原气温上升区域约占总面积的2.19%,主要分布在II区、VI区中部和III区北部,而其余地区均呈不显著减少趋势($P>0.05$),斜率变化在0.8—7.3°C/10a之间。降水量在整个研究区呈增加趋势,其中V区和III区、IV区的部分区域相对显著,覆盖范围约占总面积的26.5%。实际蒸散发量则呈现区域性的减少趋势,显著减少区域和不显著减少区域分别占9.04%和89.94%,仅有V区和VI区西部区域呈不显著增加趋势($P>0.05$),涉及面积仅为总面积的1.02%。

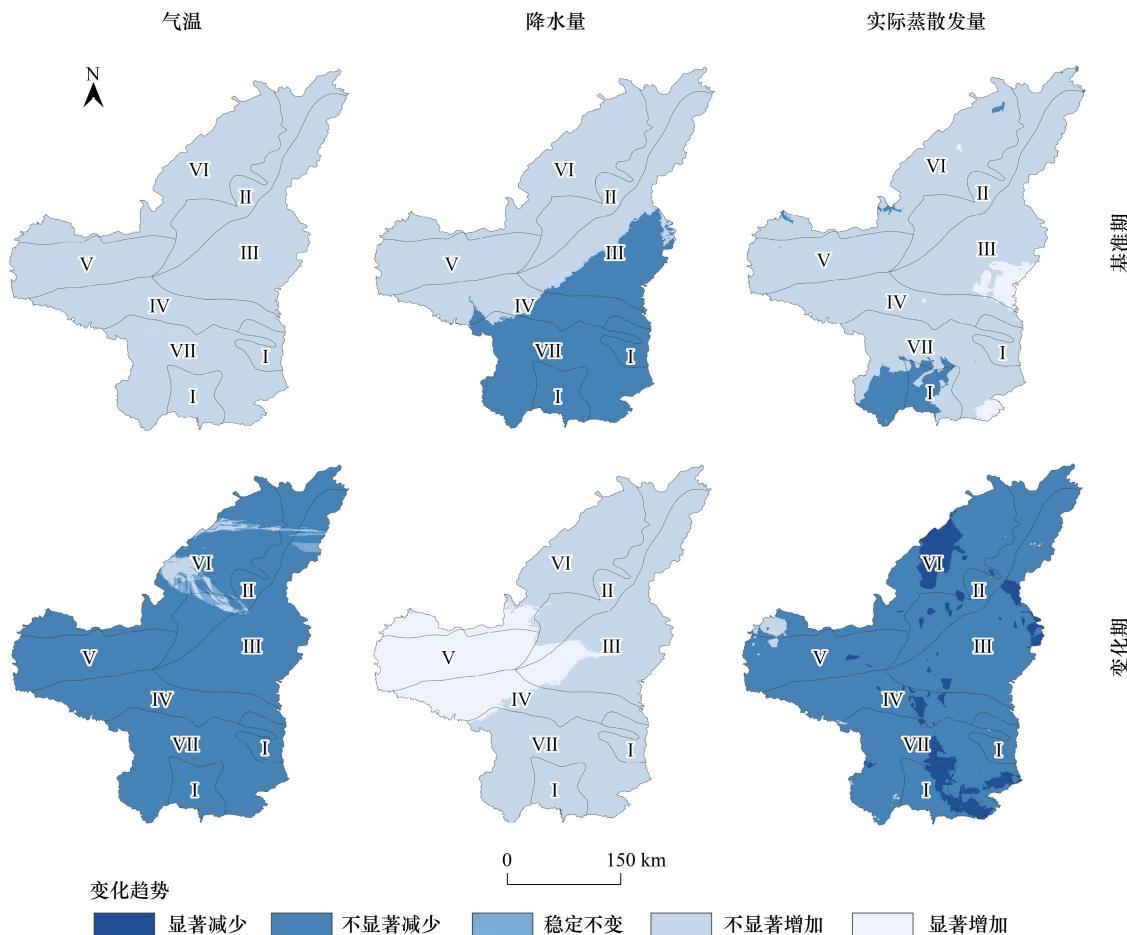


图5 陕北黄土高原不同地貌区气象要素变化趋势

Fig.5 Trends of meteorological elements in various geomorphological subdivisions of the Loess Plateau in northern Shaanxi

3.2.2 NDVI指数与气象水文要素的空间关联性

为探究陕北黄土高原不同地貌分区NDVI指数与气象要素的响应关系,采用Pearson相关系数法对陕北黄土高原不同地貌区基准期与变化期的月尺度NDVI指数与相应的月平均降水量、气温及实际蒸散发量数据序列分别进行相关分析,结果如表3所示。

两个时期的共性特征表明,陕北黄土高原不同地貌区气温与NDVI指数均呈正相关关系,除VII区外,其余六个地貌分区均达到0.05的显著水平;实际蒸散发量与NDVI指数也表现出显著的正相关,且其相关性强于气温与NDVI,相关系数r最大可达0.446($P<0.001$)。两个时期降水量与NDVI指数的相关性存在较大区别,基准期整体呈现正相关,除I区外,其余地貌分区的相关性均不显著,变化期两者则表现为不显著的负相关,且相关系数均小于0.25。与基准期对比,变化期的NDVI指数与各气象要素的相关系数均有所增加,表明高原变绿后,植被覆盖与气象要素的关系愈发紧密。

表3 不同地貌区 NDVI 与气象要素的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between NDVI and meteorological elements in various geomorphological subdivisions

时期 Period	气象要素 Meteorological elements	I 区 Zone I	II 区 Zone II	III 区 Zone III	IV 区 Zone IV	V 区 Zone V	VI 区 Zone VI	VII 区 Zone VII
基准期 Base period	气温	0.183 *	0.287 **	0.333 ***	0.262 **	0.25 **	0.211 *	0.129
	降水	0.806 ***	0.004	0.04	0.031	0.05	-0.052	-0.078
	实际蒸散发	0.325 ***	0.402 ***	0.457 ***	0.395 ***	0.387 ***	0.334 ***	0.299 ***
变化期 Change period	气温	0.206 *	0.368 ***	0.367 ***	0.296 **	0.351 ***	0.329 ***	0.089
	降水	-0.163	-0.02	-0.047	-0.109	-0.047	-0.056	-0.222 *
	实际蒸散发	0.280 **	0.442 ***	0.452 ***	0.384 ***	0.446 ***	0.406 ***	0.214 *

表中 *** 表示 $P < 0.001$, ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

3.3 NDVI 指数对气象要素响应关系的探测解析

3.3.1 因子探测分析

应用基于最优参数的地理探测器(OPGD)对陕北黄土高原不同地貌分区基准期和变化期实施因子探测分析(图6),结果表明两个时期的气温、降水、实际蒸散发对 NDVI 指数变化均有显著的驱动作用(P 值均小于 0.01)且这种作用呈现出了明显的空间分异性。总体来看,降水因子在各地貌分区中的平均解释力最大,两个时期的平均 q 值分别为 0.35 和 0.42,其次是实际蒸散发,气温的平均解释力最小。

从空间分异性的角度看,各地貌分区对 NDVI 指数变化影响最大的因子依次为:气温(I 区)、降水(II 区)、实际蒸散发(III 区)、降水(IV 区)、实际蒸散发(VI 区)、降水(VII 区)。通过对比两个时期的因子探测结果可发现,除 VI 区和 VII 区外,其余各地貌分区因子的解释力排序在两个时期均未发生变化。值得注意的是,两个时期中解释力最大的因子均出现在 I 区,该区气温因子的 q 值均大于 0.6,说明在黄土塬区气温对 NDVI 的变化起到了主导作用。

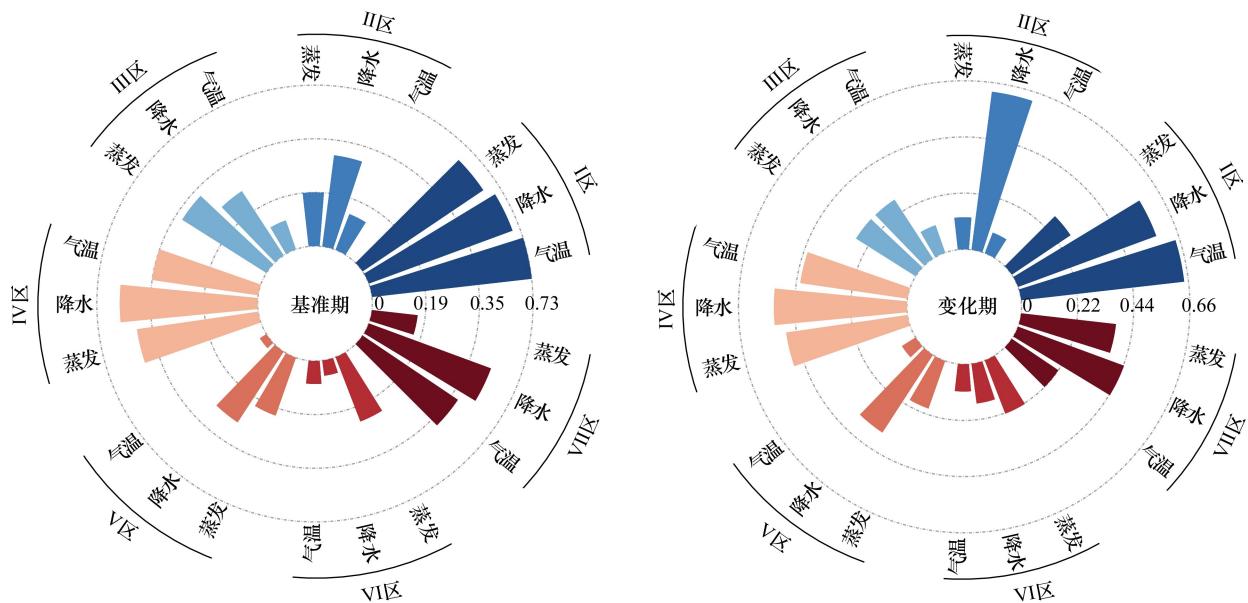


图6 不同地貌分区因子探测结果

Fig.6 Results of factor detector analysis for various geomorphological subdivisions

3.3.2 参数优化

确定空间分析的最优尺度,可有效减少不同尺度计算时的结果差异,从而提升 OPGD 分析检测的准确性和精度。为此,本文根据 NDVI 数据的分辨率和陕北黄土高原的面积范围,选择了 6 种不同的空间尺度(3、4、

5、6、7、8 km), 对应的网格数目分别为 9002、5056、3231、2247、1655、1270, 分析了不同空间尺度下各驱动因子的 q 统计值, 具体如图 7 所示。结果表明, 在空间尺度为 5 km 时, 所有驱动因子 q 值的 90% 分位数达到最大, 而超过 5 km 后, 各驱动因子的 q 值均有所下降。因此, 本研究最终选择 5 km 作为 OPGD 的最佳空间尺度。

在 5 km 的最优空间尺度下, 分别对气温、实际蒸散发和降水三个因子进行离散化参数优化。结果表明, 对于不同的驱动因子, 离散化方法和间断点的最优参数组合是不同的。气温和实际蒸散发的最优参数组合分别为基于 10 个间断点和 8 个间断点的分位数法(quantile), 而降水的最优参数组合则为基于 9 个间断点的标准差法(sd)。

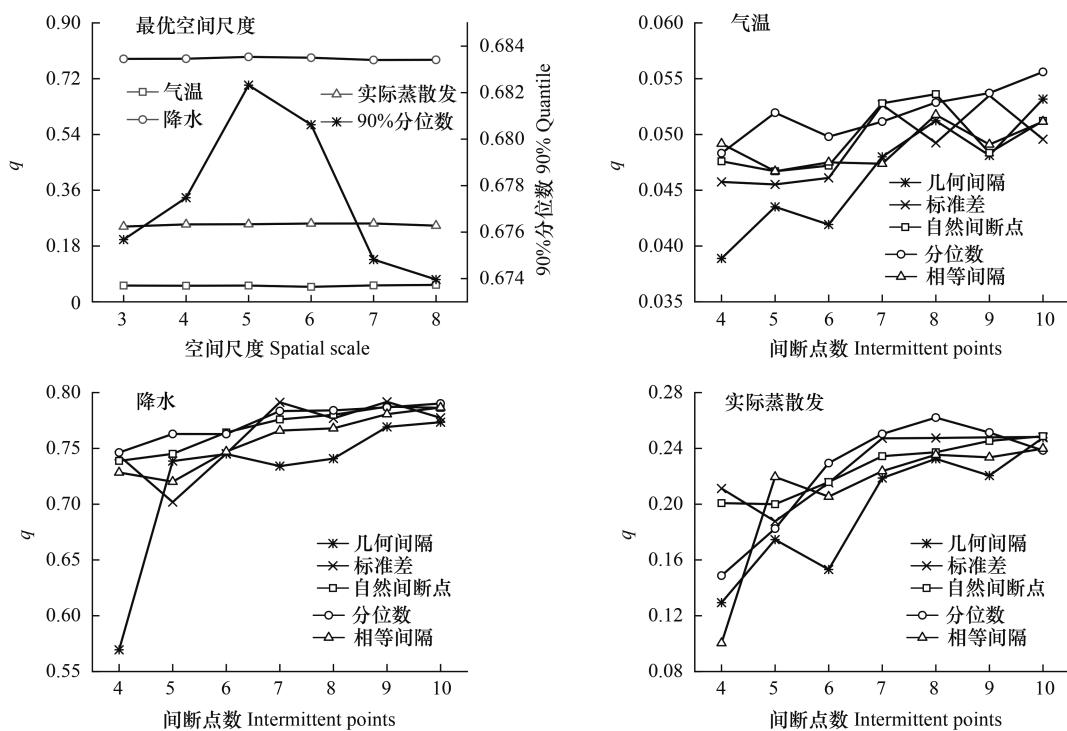


图 7 参数优化结果

Fig.7 Parameter optimization results

3.3.3 交互探测分析

为探究不同气象因子对 NDVI 指数变化的交互作用, 对陕北黄土高原不同地貌分区实施交互探测分析。结果表明, 不同地貌分区各因子的交互作用类型均为双因子增强或非线性增强, 表明陕北黄土高原 NDVI 指数的空间分布格局系受气温、降水和实际蒸散发等多种因子的共同影响, 且因子间的共同作用增强了 NDVI 指数的空间分异性。不过研究也表明, 不同时期各地貌分区的主导交互因子略有差异, 具体如图 8 所示。

气温作为 I 区的主导驱动因子, 其与降水或实际蒸散发交互后的 q 值大于 0.8, 且交互作用类型为双因子增强型, 这表明气温与其他因子的协同作用大大提升了对黄土塬区植被覆盖的影响; 而在 II 区和 V 区, 各因子的交互作用类型均为非线性增强型, 其中降水和实际蒸散发的交互作用解释力最强, q 值最高达 0.75, 这意味着盖沙黄土丘陵区和黄土宽谷丘陵区植被覆盖的空间格局受到了降水和实际蒸散发两因子的共同制约。相比基准期, 变化期内 III 区和 VI 区的主导交互因子均从降水和实际蒸散发转变为了气温和实际蒸散发, 而这进一步说明了随着黄土高原变绿, 黄土峁状丘陵区和风沙丘陵区的气温对植被覆盖的驱动作用逐渐增强; IV 区和 VII 区双因子交互解释力均大于 0.5, 其中, 降水和气温的双因子解释力最强, 这表明降水和气温同时影响着黄土梁状丘陵区和土石丘陵区植被覆盖的空间分布。

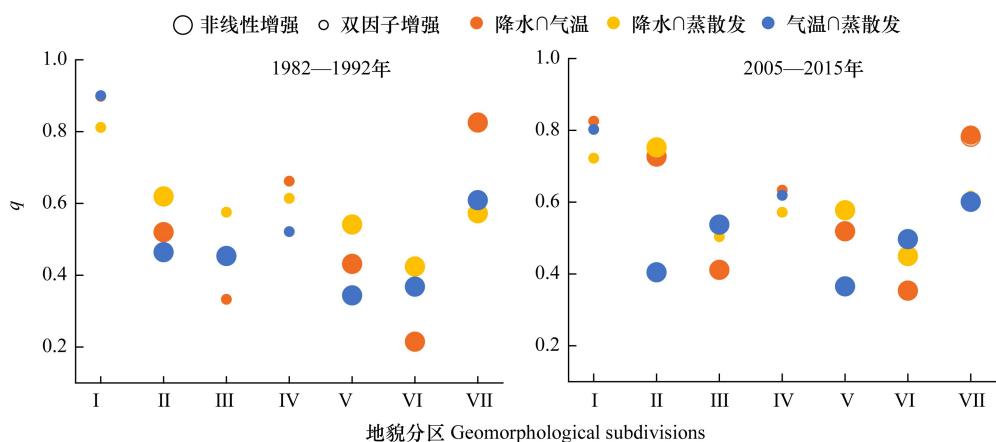


图 8 不同地貌分区交互探测分析结果

Fig.8 Results of interaction detector analysis of various geomorphological subdivisions

3.3.4 风险探测分析

为进一步揭示陕北黄土高原变绿后不同地貌区各因子在最优离散化区间内 NDVI 指数变化的差异性,对变化期多年平均气温、降水量和实际蒸散发量数据进行风险探测分析,结果如图 9 所示。

结果表明,I 区和 VII 区年平均气温处于最小范围内时,NDVI 指数达到最大,超过该范围后,随着气温的增大 NDVI 指数反而减小,说明过高的气温对这两个地貌分区的植被覆盖具有一定抑制作用。除 I 区外,各地貌分区的 NDVI 指数基本上都表现为随降水量的增加而增加,这表明降水量的增加更适合植被的生长,同时也进一步验证了降水是陕北黄土高原植被变化的关键驱动因子^[28]。此外,研究还发现不同地貌分区的 NDVI 指数会随着实际蒸散发量的增加而呈现波动变化趋势,这意味着在陕北黄土高原不同的蒸散发量对植被覆盖的影响是有显著差异的。

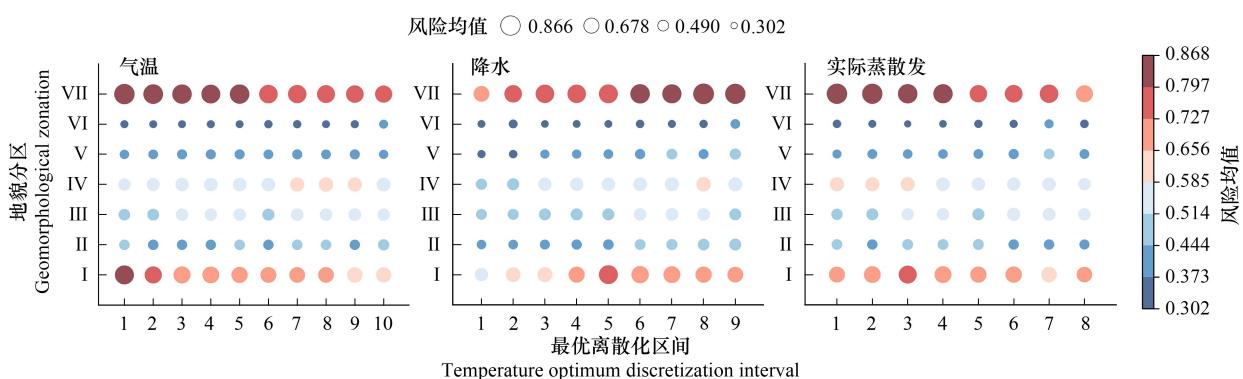


图 9 不同地貌分区风险探测分析结果

Fig.9 Results of risk detector analysis for various geomorphological subdivisions

4 讨论

4.1 植被覆被变化与土地类型流转的响应关系

研究结果表明,整个研究期内陕北黄土高原及各地貌分区 NDVI 指数呈现出显著上升趋势,且变化期的 NDVI 指数增长迅速,增长率约为基准期的 4 倍,增势面积占比更是从基准期的 77.66% 上升为 93.84%,说明退耕还林还草工程实施后陕北黄土高原的植被覆盖状况得到了明显改善,这与刘哲、刘静等人^[29-30]的研究结

果相一致。当前,随着全球对黄土高原变绿现象的持续关注,众多学者也对这一现象进行了系统探讨,都认为其与黄土高原长期的水土流失综合治理与退耕还林还草等政策息息相关,且这一结论目前也得到了学界的充分认可^[31—32],但对其贡献大小的看法则有所不同^[33—34]。

为此,将陕北黄土高原 NDVI 指数增长区域与“变绿”型土地流转的面积做以对比,以期从植被覆盖变化与土地类型流转的响应关系中有所发现。对比结果表明,1992—2015 年间耕地向草地的流转面积为 6782 km²,未利用地向草地流转面积为 3132 km²,两者合计为“变绿”型土地流转面积,共 9949 km²,这与陕北黄土高原 NDVI 指数的增势面积存在一定差异,且空间分布亦有不同(图 10),遂可见陕北黄土高原的植被覆盖变化并不能简单归因于退耕还林(草)等生态修复措施,还应与研究期内气象水文条件的变化息息相关。

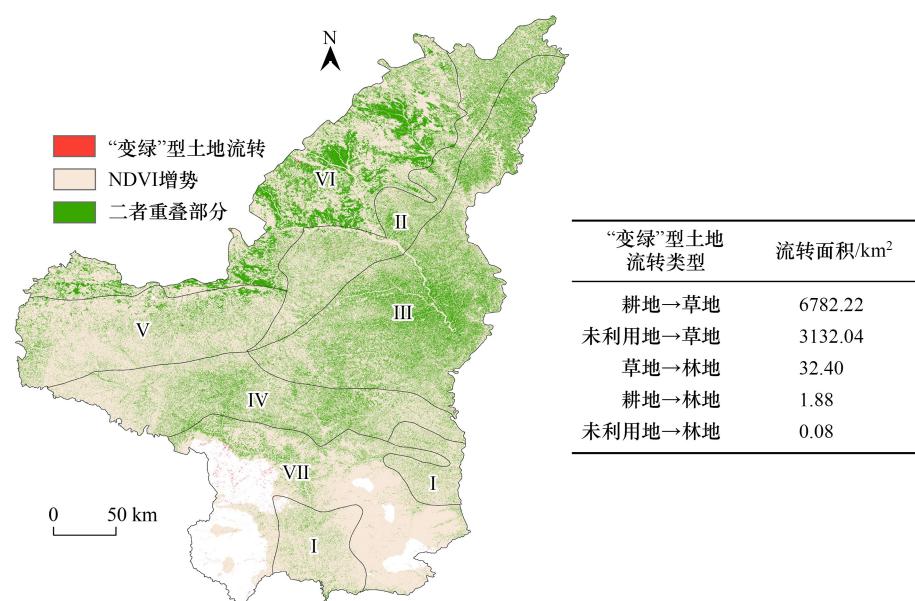


图 10 “变绿”型土地类型流转面积与 NDVI 增势区划

Fig.10 The area of "greening" land types transferred and the NDVI growth zone

同时,为了进一步夯实以上推论,对研究期内“变绿”型土地流转的总面积与 NDVI 指数变化进行了相关性检验(图 11),结果显示两者并未表现出明显的同步性特征,抑或是带有时滞的协同性,这也进一步说明陕北黄土高原的植被覆盖变化应是多要素耦合驱动的结果,气象要素在其中扮演了不可忽视的作用。

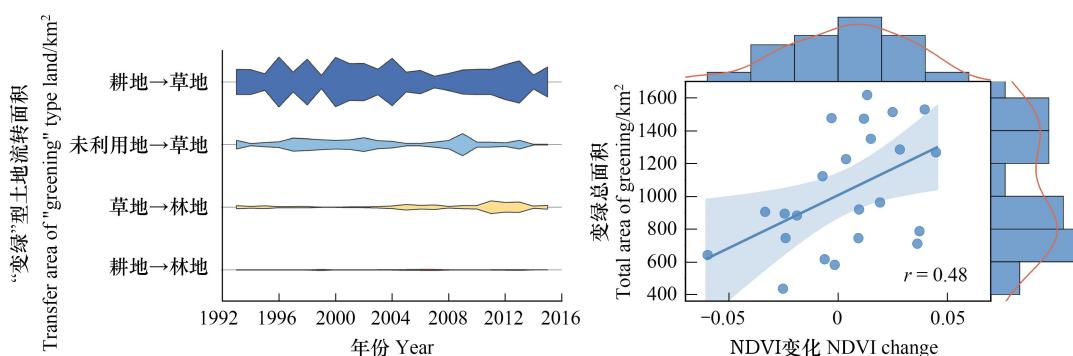


图 11 “变绿”型土地类型流转面积与 NDVI 指数变化的相关关系

Fig.11 Correlation between the area of "greening" land types in circulation and changes in NDVI

左边风筝图中阴影部分的宽度表示流转面积的大小,右边散点图中阴影部分表示 95% 置信区间

4.2 气象要素对植被覆盖的空间分异影响

研究发现气温和实际蒸散发对各地貌分区 NDVI 指数的影响较为一致,均以正相关为主,特别是在盖沙黄土丘陵区和黄土峁状丘陵区,气温和实际蒸散发量对 NDVI 指数的正相关性极为显著,说明气温和实际蒸散发量的增加会增强土壤层中微生物活性,从而加快土壤有机质分解速率,有利于植被根系生长。而对于降水因子,除风沙丘陵和土石丘陵区外,基准期其余地貌分区的降水量与 NDVI 指数均呈正相关,其中黄土塬区正相关性显著,这主要与该区地势平坦,农业发展较好,良好的降水条件能促进农作物生长有关。而对于风沙丘陵和土石丘陵区,降水则可能会加剧土壤侵蚀,造成水土流失,使土壤有机质含量减少,从而抑制植被生长^[35]。

4.3 气象要素对植被覆盖的风险探测

地理探测器(OPCD)的分析结果显示,整个研究期气温、降水和实际蒸散发对 NDVI 指数的空间分异均具有显著的驱动作用,且双因子交互作用的 q 值显著大于单因子 q 值,这表明因子间的交互作用具有协同增强性,同时也进一步证明了陕北黄土高原 NDVI 指数的空间分布格局系受气温、降水和实际蒸散发等多种因子共同影响。这一推论与耿庆玲和 Shahid 等人^[36—37]的研究成果基本一致。值得注意的是,已有研究^[38—39]预估,2100 年前我国的平均温度、降水量、实际蒸散发量仍将处于上升趋势,这也意味着气象要素之间的协同作用会进一步增强,辅以黄土高原特殊的地质与土壤条件,未来区域植被覆盖变化可能具有极大的不确定性,未来高原能否持续“变绿”仍需深入研究。

4.4 局限性分析

黄土高原“变绿”的本质是区域叶面积指数(LAI)与叶绿素含量的变化以及植被结构的改变。尽管透过文献可知,黄土高原 NDVI 与植被的 LAI 和叶绿素含量有显著的正相关关系^[40—43],且黄土高原 LAI 较低,年最大 LAI 不超过 3,可避免 NDVI 饱和的影响^[44—46],但 NDVI 受其指标构建方法制约,在表征特定植被结构参数和地表植被真实变化情况上仍旧存在一定不足。因此,本研究结论仅适用于区域尺度的植被覆盖与气象要素响应的长时序动态分析,而对于单一植被类型或小区域的响应关系则需要基于植被变绿的物理驱动机制,构建可反映气候变化与人类活动对陆地植被生理过程影响的植被指数或指标体系,并进一步阐释陆地生态系统植被参数与气象要素之间的相关关系及其空间异质性变化。当然,植被指数或指标体系的改变,也意味着更多与陆地植被生理过程相关的气象要素需要纳入考量范畴,且响应关系的尺度效应需要进一步探讨。

5 结论

本文探究了陕北黄土高原不同地貌分区气象要素对植被覆盖的空间分异影响及风险,主要结论如下:

(1)陕北黄土高原及各地貌分区在研究期内 NDVI 指数均呈显著上升趋势,且阶段化分异明显,1982—1992 年为缓慢上升期,2005—2015 年为快速上升期;各地貌区气温和蒸散发量在高原变绿前后趋势变化差异明显,1982—1992 年主要呈不显著增加趋势,而 2005—2015 年则表现为不显著减少趋势;两个时期降水量的空间异质性较为显著,其中北部区为持续增加趋势,而南部地区则由减少逆转为增加趋势。

(2)不同地貌区 NDVI 指数与气温和蒸散发均呈正相关,且蒸散发与 NDVI 的相关性强于气温;相对高原变绿前,2005—2015 年 NDVI 指数对各气象水文要素的响应强度均有所增大。

(3)OPCD 因子检测结果显示 5km 空间网格是评价气候变化对陕北黄土高原植被覆盖变化影响的最佳空间尺度,各地貌分区对 NDVI 指数变化影响最大的气象因子依次为:气温(黄土塬)、降水(盖沙黄土丘陵)、蒸散发(黄土峁状丘陵)、降水(黄土梁状丘陵)、降水(黄土宽谷丘陵)、蒸散发(风沙丘陵)、降水(土石丘陵);交互探测表明气象因子间的交互作用对 NDVI 指数的空间分异具有协同增强性,但不同时期各地貌区的主导交互因子略有差异。

(4)风险探测发现陕北黄土高原中不同的蒸散发量对 NDVI 指数的影响有显著空间差异。值得一提的是,在黄土塬区和土石丘陵区过高的气温会对高原变绿具有一定的抑制作用。

(5) 陕北黄土高原研究期内“变绿”型土地流转总面积与 NDVI 指数变化情况具有一定差异,且二者并未表现出明显的同步性特征,说明陕北黄土高原的植被覆盖变化并不能简单归因于退耕还林(草)等生态修复措施,而应是多要素耦合驱动的结果,气象要素在其中扮演了不可忽视的作用。

参考文献(References):

- [1] 解晗, 同小娟, 李俊, 张静茹, 刘沛荣, 于裴洋. 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. 生态学报, 2022, 42(11): 4536-4549.
- [2] Mo K L, Chen Q W, Chen C, Zhang J Y, Wang L, Bao Z X. Spatiotemporal variation of correlation between vegetation cover and precipitation in an arid mountain-oasis river basin in northwest China. Journal of Hydrology, 2019, 574: 138-147.
- [3] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玲, 陶帅, 徐新良. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测. 地理学报, 2019, 74(9): 1758-1776.
- [4] 蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 张治国. 基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征. 生态学报, 2011, 31(22): 6708-6716.
- [5] 赵楠, 赵颖慧, 邹海凤, 白晓红, 甄贞. 1990—2020 年黑龙江省植被覆盖度的时空变化趋势及驱动力. 应用生态学报, 2023, 34(5): 1320-1330.
- [6] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, Gao P, Wang F, Zhao G J. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 209/210: 87-99.
- [7] 刘文瑞, 李晓婷, 李彤, 贾宝全. 基于 MODIS 和 CASA 模型的伊春市森林植被 NPP 变化特征及其影响因子分析. 生态学杂志, 2022, 41(1): 150-158.
- [8] 方贺, 严佩文, 石见, 康娟, 刘海蓉, 陈丹, 罗继, 徐栋. 阿克苏地区植被生态质量时空变化及其驱动机制. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1907-1916.
- [9] Hu M M, Xia B C. A significant increase in the normalized difference vegetation index during the rapid economic development in the Pearl River Delta of China. Land Degradation & Development, 2018: ldr.3221.
- [10] Yang Z, Shen Y Y, Jiang H W, Feng F S, Dong Q L. Assessment of the environmental changes in arid and semiarid mining areas using long time-series Landsat images. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(37): 52147-52156.
- [11] Lamchin M, Lee W-K, Jeon S W, Wang S W, Lim C H, Song C, Sung M. Long-term trend and correlation between vegetation greenness and climate variables in Asia based on satellite data. Science of the Total Environment, 2018, 618: 1089-1095.
- [12] 赵明伟, 王妮, 施慧慧, 江岭, 王春. 2001—2015 年间我国陆地植被覆盖度时空变化及驱动力分析. 干旱区地理, 2019, 42(2): 324-331.
- [13] 雷茜, 胡忠文, 王敬哲, 张英慧, 邬国锋. 1985—2015 年中国不同生态系统 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2023, 43(15): 1-14.
- [14] 郝爱华, 薛娴, 段翰晨, 彭飞, 尤全刚. 青藏高原典型草地 NDVI 时空演变的季节差异及其气候驱动. 生态学报, 2023, 43(1): 352-363.
- [15] Tian L, Zhang B Q, Chen S Y, Wang X J, Ma X G, Pan B T. Large-scale afforestation enhances precipitation by intensifying the atmospheric water cycle over the Chinese Loess Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022, 127(16): e2022JD036738.
- [16] 段艺芳, 任志远, 孙艺杰. 陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应. 生态学报, 2020, 40(10): 3408-3419.
- [17] 张博, 刘长星, 王璇. 陕北黄土高原植被覆盖时空变化及其归因分析. 测绘通报, 2022, (8): 22-29.
- [18] 刘家福, 马帅, 李帅, 任春颖, 毛德华, 张柏. 1982—2016 年东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候变化的响应. 生态学报, 2018, 38(21): 7647-7657.
- [19] 荔童, 梁小英, 张杰, 耿雨, 耿甜伟, 石金鑫. 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系及其驱动因子分析——以陕北黄土高原为例. 生态学报, 2023, 43(16): 1-14.
- [20] Li C, Wu P T, Li X L, Zhou T W, Sun S K, Wang Y B, Luan X B, Yu X. Spatial and temporal evolution of climatic factors and its impacts on potential evapotranspiration in Loess Plateau of Northern Shaanxi, China. Science of the Total Environment, 2017, 589: 165-172.
- [21] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [22] Yang J E, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [23] 涂又, 姜亮亮, 刘睿, 肖作林, 闵婕. 1982—2015 年中国植被 NDVI 时空变化特征及其驱动分析. 农业工程学报, 2021, 37(22): 75-84.
- [24] 王劲峰, 许成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [25] Ju H R, Zhang Z X, Zuo L J, Wang J F, Zhang S R, Wang X A, Zhao X L. Driving forces and their interactions of built-up land expansion based on the geographical detector - a case study of Beijing, China. International Journal of Geographical Information Science, 2016, 30(11):

2188-2207.

- [26] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, Xu C D. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [27] 李琛, 吴映梅, 高彬嫔, 武燕, 郑可君, 李婵. 高原湖泊乡村聚落空间分异及驱动力探测——以环洱海地区为例. *经济地理*, 2022, 42(4): 220-229.
- [28] 常铮, 李崇贵, 张家政, 杨丹. 基于 GEE 云平台的陕北黄土高原生态修复前后植被变化及原因. *西安理工大学学报*, 2022, 38(3): 337-345.
- [29] 刘哲, 邱炳文, 王壮壮, 齐文. 2001—2014 年间黄土高原植被覆盖状态时空演变分析. *国土资源遥感*, 2017, 29(1): 192-198.
- [30] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应. *生态学报*, 2020, 40(2): 678-691.
- [31] Yu K-x, Zhang X, Xu B x, Li P, Zhang X m, Li Z b, Zhao Y. Evaluating the impact of ecological construction measures on water balance in the Loess Plateau region of China within the Budyko framework. *Journal of Hydrology*, 2021, 601: 126596.
- [32] Zhu P Z, Zhang G H, Wang H X, Yang H Y, Zhang B J, Wang L L. Effectiveness of typical plant communities in controlling runoff and soil erosion on steep gully slopes on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126714.
- [33] Song Y, Wang Y Q, Jin L, Shi W Y, Aryal J, Comber A. Quantitative contribution of the Grain for Green Program to vegetation greening and its spatiotemporal variation across the Chinese Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(11): 1878-1891.
- [34] 贾路, 于坤霞, 徐国策, 任宗萍, 高海东, 李占斌, 李鹏. 基于耦合协调度的黄土高原地区 NDVI 与降水关系的变异诊断. *生态学报*, 2021, 41(18): 7357-7366.
- [35] 姚昆, 周兵, 何磊, 李玉霞. 川西南山地区 2000—2018 年土壤侵蚀时空动态变化特征. *水土保持通报*, 2021, 41(4): 224-230, 251.
- [36] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 田智慧. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应. *生态学报*, 2022, 42(9): 3557-3568.
- [37] Naeem S, Zhang Y Q, Zhang X Z, Tian J, Abbas S, Luo L L, Meresa H K. Both climate and socioeconomic drivers contribute to vegetation greening of the Loess Plateau. *Science Bulletin*, 2021, 66(12): 1160-1163.
- [38] 巢清尘, 李柔珂, 崔童, 魏超. 中国气候变化科学认识进展及未来展望——中国《第四次气候变化国家评估报告·第一部分》解读. *中国人口·资源与环境*, 2023, 33(01): 74-79.
- [39] 陈惺, 王军邦, 何启凡, 王春雨, 叶辉. 未来气候情景下中国植被净初级生产力稳定性及气候影响. *地理学报*, 2023, 78(03): 694-713.
- [40] 韩衍欣, 蒙继华, 徐晋. 基于 NDVI 与物候修正的大豆长势评价方法. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 177-182.
- [41] 刘明, 冯锐, 纪瑞鹏, 武晋雯, 王宏博, 于文颖. 基于 MODIS-NDVI 的春玉米叶面积指数和地上生物量估算. *中国农学通报*, 2015, 31(6): 80-87.
- [42] 王晓飞, 李志洪, 袁家萍, 付进. 玉米品种冠层 NDVI 与叶绿素的关系. *中国农学通报*, 2010, 26(16): 175-179.
- [43] Johnson L F. Temporal stability of an NDVI-LAI relationship in a Napa Valley vineyard. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2003, 9(2): 96-101.
- [44] 孙康慧, 曾晓东, 李芳. 中国生态脆弱区叶面积指数变化的主导气象因子研究. *自然资源学报*, 2021, 36(7): 1873-1892.
- [45] Bajocco S, Ginaldi F, Savian F, Morelli D, Scaglione M, Fanchini D, Raparelli E, Bregaglio S U M. On the use of NDVI to estimate LAI in field crops: implementing a conversion equation library. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3554.
- [46] 王志慧, 姚文艺, 汤秋鸿, 杨二, 孔祥兵, 王玲玲, 肖培青. 2000—2014 年黄土高原植被叶面积指数时空变化特征. *中国水土保持科学*, 2017, 15(1): 71-80.