

# 气候变化和人类活动对黄河流域 砒砂岩区植被覆盖的影响

盛艳<sup>1,2</sup>, 刘林甫<sup>1</sup>, 圆圆<sup>1</sup>, 王硕<sup>1</sup>, 李娟<sup>3</sup>, 安丽<sup>4</sup>

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2.荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018;

3.准格尔旗自然资源局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 4.鄂尔多斯市国土空间规划院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要:** [目的] 砒砂岩区是黄河流域土壤侵蚀最为严重的区域, 探讨该地区植被覆盖度变化状况及其影响的驱动因素, 以为该区植被恢复及生态重建工作提供科学参考。[方法] 基于 2000—2022 年的 MOD13Q1 NDVI 数据, 运用 Sen 趋势、Mann-Kendall 显著性检验、Hurst 指数、残差分析等方法分析砒砂岩区研究期内的植被覆盖度时空变化趋势, 并探究植被覆盖度与气候因子及人类活动的响应关系。[结果] ① 2000—2022 年砒砂岩区植被覆盖度增加, 增速为  $4\%/a$  ( $p < 0.05$ ); 空间尺度上, 研究区植被覆盖度在 3 个区有明显的分异效果, 整体呈现“南高北低, 东高西低”的分布态势; ② 研究期内, 砒砂岩区植被覆盖度与降水量呈正相关区域占总面积的 66.30%, 负相关区域占总面积的 33.70%; 与气温呈正相关区域占总面积的 92.19%, 负相关区域占总面积的 7.81%; ③ 残差分析结果表明, 2000—2011 年人类活动多以负面影响为主, 2012—2022 年人类活动多以正向影响为主。[结论] 研究期间砒砂岩区植被覆盖度呈显著上升趋势, 与年均气温的相关性高于年降雨量, 且一系列生态保护工程为改善植被情况做出了巨大贡献。

**关键词:** 植被覆盖度; 气候变化; 人类活动; 地理探测器; 砒砂岩区

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)06-0412-09

**中图分类号:** X171.1, Q948

**文献参数:** 盛艳, 刘林甫, 圆圆, 等. 气候变化和人类活动对黄河流域砒砂岩区植被覆盖的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 412-420. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.046; Sheng Yan, Liu Linfu, Yuan Yuan, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation coverage in arsenic sandstone area of Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 412-420.

## Effects of Climate Change and Human Activities on Vegetation Coverage in Arsenic Sandstone Area of Yellow River Basin

Sheng Yan<sup>1,2</sup>, Liu Linfu<sup>1</sup>, Yuan Yuan<sup>1</sup>, Wang Shuo<sup>1</sup>, Li Juan<sup>3</sup>, An Li<sup>4</sup>

(1. Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Key Laboratory of State

Forest Administration for Desert Ecosystem Protection and Restoration, Hohhot, Inner

Mongolia 010018, China; 3. Jungar Banner Natural Resources Bureau, Ordos, Inner Mongolia

017000, China; 4. Ordos Land and Space Planning Institute, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

**Abstract:** [Objective] The arsenic sandstone area is the most serious soil erosion area in the Yellow River basin. Vegetation coverage changes and their driving factors were determined in order to provide a scientific reference for vegetation restoration and ecological reconstruction in this area. [Methods] MOD13Q1 NDVI data from 2000 to 2022 were used with the Sen trend, Mann-Kendall significance test, Hurst index, residual analysis, and other methods to determine the temporal and spatial variation trends of vegetation coverage during the study period in the arsenic sandstone area. The response relationships between vegetation coverage and climatic factors and human activities were also determined. [Results] ① Vegetation coverage in the

收稿日期: 2023-07-19

修回日期: 2023-09-12

资助项目: 内蒙古科技计划项目“黄河流域砒砂岩区抗蚀控沙与脆弱生态系统精准修复技术集成与示范”(2020GG0075); 内蒙古自治区“科技兴蒙”行动重点专项“流域生态系统结构和功能演变及其对水沙过程的影响: 产业—经济—人文结构变化对区域生态系统影响”(2022EEDSKJXM005-01)

第一作者: 盛艳(1979—), 女(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与土地利用方面的研究。Email: shengyan315@126.com。

arsenic sandstone area increased by 4%/yr ( $p < 0.05$ ) from 2000 to 2022. Vegetation coverage in the study area exhibited obvious spatial differences in the three study areas, showing the spatial distribution trends of “higher in the south and lower in the north” and “higher in the east and lower in the west”. ② The area with positive correlations between vegetation coverage and precipitation during the study period accounted for 66.30% of the total area, and the area with negative correlations accounted for 33.70% of the total area. The area with positive correlations between vegetative coverage and temperature accounted for 92.19% of the total area, and the negative correlation area accounted for 7.81% of the total area; ③ The residual results showed that human activities in 2000—2011 produced mainly negative effects on vegetative coverage, and human activities in 2012—2022 produced mainly positive effects. [Conclusion] Vegetation coverage in the arsenic sandstone area significantly increased during the study period, and had a higher correlation with annual average temperature than with annual rainfall. A series of ecological protection projects have made significant contributions towards increasing vegetation coverage.

**Keywords:** vegetation coverage; climate change; human activity; geographic detectors; arsenic sandstone area

植被作为地球陆地生态系统的组成部分之一,是地球生态系统中 3 大圈层进行能量交换和物质循环的重要载体<sup>[1-2]</sup>,发挥着防风固沙,调节气候,保护水土资源,维护生态稳定等重要作用,是维持人类正常生产、生活的最有力保障<sup>[3]</sup>。基于归一化植被指数(normalized different vegetation index, NDVI)计算得出的植被覆盖度(fractional vegetation coverage, FVC),是揭示植被生长状况,反映区域内生态环境质量的最有效指标之一<sup>[4]</sup>。在当今全球变暖和可持续发展的背景下,研究植被覆盖度变化已成为探讨全球生态环境变化的重要议题,相关研究表明,植被覆盖度受到自然因素和人为因素的综合作用<sup>[5-6]</sup>。由于区域水热组合存有差异,导致植被覆盖存在差异<sup>[7]</sup>,影响水热组合的直接因子便为降雨、气温,因此监测分析植被覆盖度与气候变化的响应关系已经成为国内外植被覆盖度研究中的热点问题<sup>[8]</sup>。

砒砂岩区是中国水土流失和土壤侵蚀较为严重的地区,基岩为砒砂岩,由砂页岩与泥质砂岩结合而成的岩石互层,由于结成岩石的程度较低、各个沙粒之间胶结水平差、结构稳定性较低,且含有大量黏土矿物,有“遇风成沙,遇水成泥”的特点,是黄河主要的粗泥沙来源区。对此,众多专家以 NDVI 为指标,对砒砂岩区的植被覆盖度时空变化、主要驱动因子进行探究。研究发现,自砒砂岩实施退耕还林工程以来取得的效果显著。许红梅<sup>[9]</sup>通过遥感与地面实测相结合的方法,发现砒砂岩区长川流域植被覆盖度大幅度提高,分布等级集中在 40%~50% 水平;张喜旺<sup>[10]</sup>探讨了砒砂岩区降雨与植被的匹配关系,发现研究区降雨的集中、偏斜程度和波动性比植被的更为显著;黎铭<sup>[11]</sup>对砒砂岩区植被盖度与水热因子的空间和时滞关系进行研究,发现植被恢复速度与降水相关性较

高,并对气温和降水的响应都存在一定的滞后现象。总体上,众多学者对砒砂岩区植被覆盖度的研究取得了长足进展,但并未分离气候变化和人类活动对植被覆盖度的影响。鉴于此,本文以砒砂岩区为研究区,基于 2000—2022 年遥感影像数据、气象数据、土地利用数据和社会经济数据,运用 Sen+Theil-Sen Median 趋势分析和残差分析法,探究砒砂岩区植被覆盖时空变化特征对气候变化及人类活动的响应,为砒砂岩区植被恢复、生态保护和生态修复提供科学依据。

## 1 研究区概况

砒砂岩区位于晋陕蒙 3 省交界地带,处于黄河“几”字湾内侧东北部,地理位置为 38°59′—39°40′N, 109°59′—110°44′E,地势自西北向东南倾斜,总面积为  $1.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。根据地表覆盖物及覆盖程度不同,砒砂岩区可分为覆土区、覆沙区、裸露区 3 大类型区(图 1)。覆土区黄土覆盖层约为 1.5 m,层理发育,岩性为砂岩和泥岩;覆沙区的覆盖层为沙,岩性为泥岩、含砾砂岩、页岩;裸露区的岩性通常为砾岩、砂岩、泥岩。砒砂岩区气候类型属于温带大陆性季风气候,冬季寒冷夏季炎热,四季分明,全年平均气温约为 7℃,年均降雨约为 350 mm,无霜期约为 150 d。由于当地频繁的暴雨风沙活动,致使当地水土流失严重,造成千沟万壑的景象<sup>[12]</sup>。受当地独特的气候环境和复杂的地形条件影响,抗旱、抗寒的植物是砒砂岩区的主要植被类型,草本植被以羊草(*Leymus chinensis*)、猪毛菜(*Salsola nitraria*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等为主,乔灌木主要有山杏(*Armeniaca sibirica*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等。

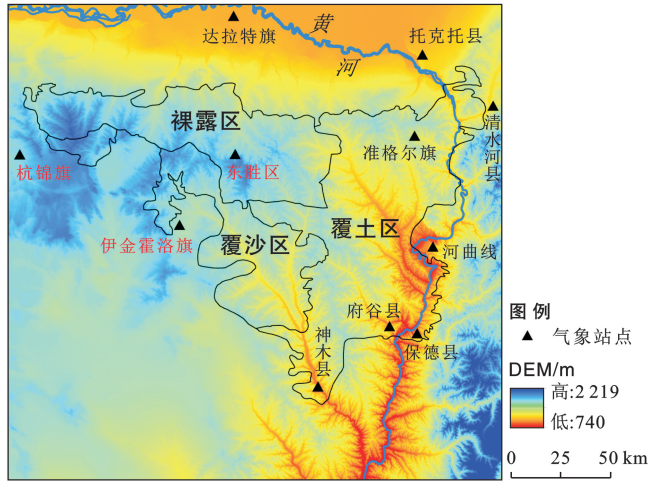


图 1 黄河流域砒砂岩区地理位置示意图

Fig.1 Geographical location diagram of arsenic sandstone area in Yellow River basin

## 2 数据来源与方法

### 2.1 数据来源及预处理

MOD13Q1 NDVI 数据主要来源于 <https://lad-sweb.modaps.eosdis.nasa.gov> 网站,其影像数据时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 250 m。气象数据来源于中国气象数据网和中国科学院资源环境科学数据中心,获取砒砂岩区 12 个气象站点 2000—2022 年平均气温和降水量数据,使用 ANUSPLIN 专业气象插值得到研究区内降水、气温栅格数据。地形数据来源于地理空间数据云平台。土地利用数据及社会经济数据来源于中国科学院资源与环境数据中心。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 植被覆盖度估算及趋势分析

(1) 植被覆盖度 FVC 计算。通常计算大尺度的植被覆盖度采用像元二分模型获取,计算公式为:

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

式中:  $NDVI_{soil}$  为裸土覆盖像元值;  $NDVI_{veg}$  为纯植被覆盖像元值。分级标准为低植被覆盖度(0~0.1);中低植被覆盖(0.1~0.3);中植被覆盖(0.3~0.5);中高植被覆盖(0.5~0.7);高植被覆盖(0.7~1)。

(2) Sen 趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检验。Theil-Sen Median 方法又被称为 Sen 斜率估计,是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法。该方法计算效率高,对于测量误差和离群数据不敏感,常被用于长时间序列数据的趋势分析中<sup>[13]</sup>。计算公式为:

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

式中:  $x_j, x_i$  为时间序列数据; slope 大于 0 表示时

间序列呈现上升趋势; slope 小于 0 表示时间序列呈现下降趋势。

Mann-Kendall 是一种非参数统计检验方法,其优点是不需要测量值服从正态分布,也不要求趋势是线性的,并且不受缺失值和异常值的影响,在长时间序列数据的趋势显著检验中得到了十分广泛的应用<sup>[14]</sup>。其统计检验方法为:

对于时间序列  $X_i, i = 1, 2, 3 \dots i \dots j \dots n$ 。定义标准化检验统计量  $Z$ :

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

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

$$\text{sign} = \begin{cases} 1 & (\theta > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ -1 & (S < 0) \end{cases} \quad (5)$$

$$E(S) = 0 \quad (6)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (7)$$

式中:  $S$  为检验统计量;  $Z$  为标准化的检验统计量;  $x_j, x_i$  为时间序列数据;  $n$  为序列样本数。

(3)  $C_v$  变异系数分析。变异系数( $C_v$ )通常用来表示一组变量数据变化的稳定性程度,即为数据的波动程度<sup>[15]</sup>,计算公式为:

$$C_v = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n}}{\bar{x}} \quad (8)$$

式中:  $\bar{x}$  为 FVC 均值。  $C_v$  值越大,则表明 FVC 分布离散,数据波动大;反之,则表明数据集中,时序稳定。

(4) Hurst 指数分析。基于 R/S 算法的 Hurst 指数预测数据的未来变化趋势。通过分析时间序列信息的长期依赖性及相关性,探讨其变化的可持续性。公式原理参见文献<sup>[16]</sup>。

2.2.2 气候因子偏相关分析 通常采用皮尔逊(Pearson)相关分析法,对 FVC 及降水、气温数据进行像元相关分析,以此反映 FVC 对气候因素的相关性程度及空间分布规律。计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式中:  $x_i$  为研究区第  $i$  年 FVC 值;  $y_i$  为第  $i$  年气候的值;  $\bar{x}$  为 FVC 数据的平均值;  $\bar{y}$  为气候因子数据



的平均值;  $n$  为数据的时间序列长度。相关系数  $R$  值的绝对值介于  $0\sim1$  之间。 $R$  越接近 1, 表示 FVC 值与气候因子之间的相关程度就越强; 反之,  $R$  越接近于 0, NDVI 值与气候因子之间的相关程度就越弱。

偏相关分析是在皮尔逊相关分析的基础上剔除其他气候因素影响, 探究 FVC 对单一气候因子之间的关系, 可用来分析影响 FVC 变化的主控气候因素<sup>[17]</sup>。计算公式为:

$$R_{xy-z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)(1-R_{yz}^2)}} \tag{10}$$

式中:  $R_{xy-z}$  表示剔除  $z$  因子影响;  $x, y$  为偏相关系数。

2.2.3 人类活动残差分析 残差分析法是在已经建立的植被覆盖度与气候因素的二元线性回归方程的基础上重新构建仅受气候影响的回归方程模型, 通过计算观测值与实际值的差值, 以此视为人类活动影响<sup>[18]</sup>。计算公式为:

$$NDVI_{pre} = a + b \times T + c \times P \tag{11}$$

式中:  $a, b, c$  为参数;  $T$  表示为年均气温;  $P$  表示为年降水量。

$$NDVI_{hum} = NDVI_{act} - NDVI_{pre} \tag{12}$$

式中:  $NDVI_{hum}$ ,  $NDVI_{act}$ ,  $NDVI_{pre}$  分别表示实际值、观测值、残差值。若  $NDVI_{hum}$  大于 0, 表明人类活动对 FVC 变化产生正向影响; 若  $NDVI_{hum}$  小于 0, 表明人类活动产生负面影响。

2.2.4 地理探测器 本文利用地理探测器中的因子探测器检测所选择驱动因子对植被覆盖度 FVC 的解释力。交互探测器用于检测两个因子交互协同作用下对研究区植被覆盖度 FVC 的影响。即比较两个单

因子  $q$  值与两因子交互作用下的  $q$  值, 从而可以判断多因子交互作用下的交互方式与方向。交互作用可分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、相互独立、非线性增强<sup>[19]</sup>。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖度时空演变特征

2000—2022 年砒砂岩区多年平均植被覆盖度为 0.41, 在 3 个分区中表现出明显的空间分异性, 呈现出自西北向东南递增的趋势。裸露区主要表现为中低植被覆盖、中植被覆盖; 覆沙区表现为中植被覆盖; 覆土区表现为中植被覆盖、中高植被覆盖。参考已有研究并结合砒砂岩区多年间实际植被发展状况<sup>[20]</sup>, 将植被覆盖度变化稳定性分为 5 个等级: 低波动变化、较低波动变化、中波动变化、较高波动变化和高波动变化。由图 2 可知, 砒砂岩区植被覆盖度稳定性均值为 0.20, 较高及高波动变化( $C_v > 0.25$ )区域集中分布在裸露区及覆土区、覆沙区及覆土区交界一带, 该区域行政区划主要在鄂尔多斯东胜区、伊金霍洛旗一带, 经济发达, 人类活动频繁是此区域的主要特点。由图 3 可知, 砒砂岩区植被覆盖度均值在研究期内变化显著, 2000 年全区均值为 0.27, 2022 年为 0.52, 多年增长速率为 4%/a。植被覆盖度在 2011, 2015 和 2021 年处于低谷状态, 均值分别为 0.34, 0.37 和 0.41, 在研究期内总体呈现出稳定上升态势, 砒砂岩区植被覆盖度由中低植被覆盖向中植被覆盖的过渡时期。砒砂岩区不同类型区植被覆盖度变化特征表现为: 覆土区 > 覆沙区 > 裸露区, 覆沙区与整个研究区植被覆盖度水平差距不大。

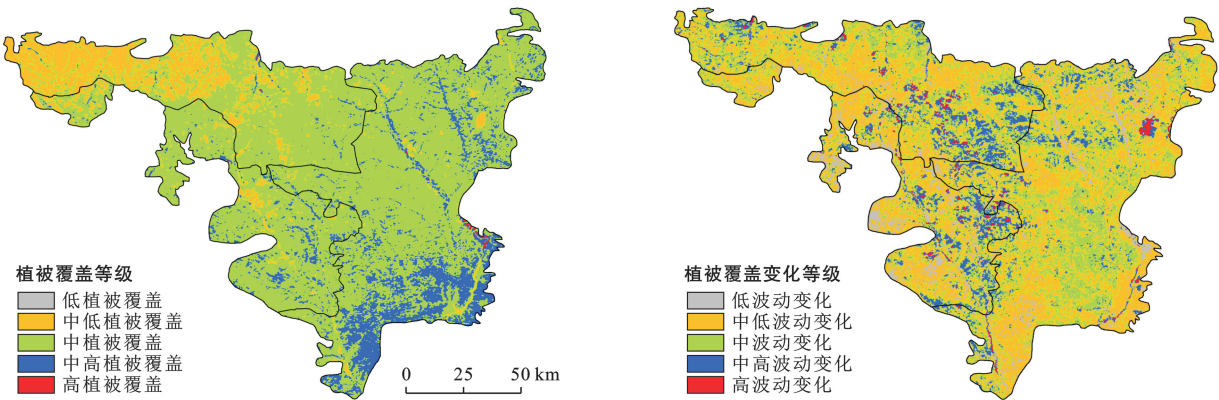


图 2 黄河流域砒砂岩区植被覆盖度均值及稳定性

Fig.2 Mean and stability of vegetation coverage in arsenic sandstone area of Yellow River basin

利用 Sen 法计算研究期内砒砂岩区植被覆盖度变化趋势, 并结合 Mann-Kendall 检验法判断变化趋势的显著性(显著性水平  $\alpha=0.05$ )。由图 4 可以看出,

砒砂岩区植被覆盖度变化斜率为  $-0.022\sim0.033/a$ , 研究区大部分区域生态环境呈现明显改善, 占总面积的 63.26%, 稳定不变区域占总面积的 33.99%。从空间



分布来看,覆土区与覆沙区以明显改善为主,稳定不变及明显退化零星分布其中,裸露区植被覆盖度变化较为稳定。这是由于砒砂岩裸露区较于覆土区和覆沙区降水更为稀少、气候更为炎热、地表岩层裸露,致使生境十分恶劣,植被更难以生长存活。

研究期内砒砂岩区植被覆盖度 Hurst 指数介于 0.15~0.95 之间,均值为 0.45。其中,Hurst 指数小于 0.5 的区域占总面积的 74.25%,表明砒砂岩区植被覆盖度变化的反向特征强于同向特征,砒砂岩区的植被在未来会有退化风险。将 Hurst 指数与 slope 倾斜率叠加耦合分析,将变化趋势分为 6 个变化等级:强反持续性减少、轻微持续性减少、强持续性减少、强反持续性增加、轻微持续性增加、强持续性增加。由图 5 可知,研究区植被覆盖度变化以轻微持续性增加以及强反持续性增加为主,分别占到研究区总

面积的 79.12%和 14.40%,其中强反持续性增加集中分布在研究区西北部及东南部地区。

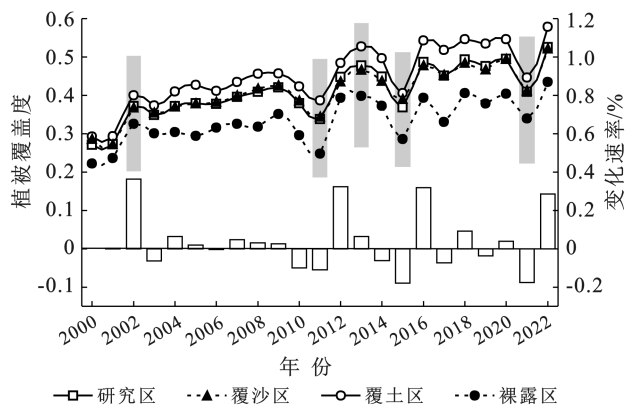


图 3 黄河流域砒砂岩区植被覆盖度时空演变特征  
Fig.3 Spatiotemporal evolution characteristics of vegetation coverage in arsenic sandstone area of Yellow River basin

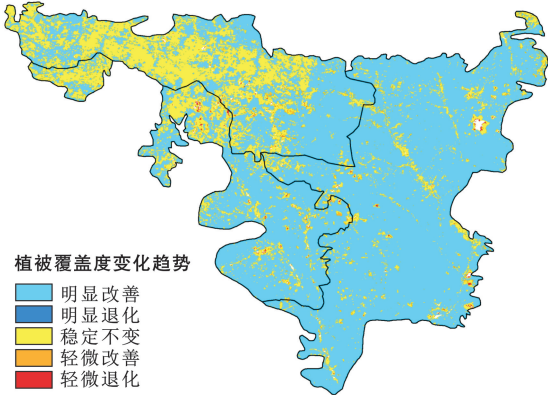
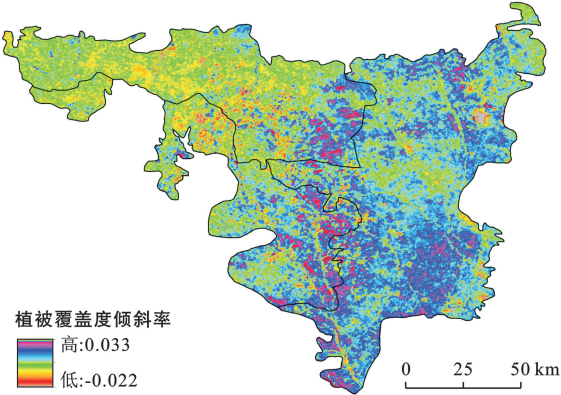


图 4 黄河流域砒砂岩区 2000—2022 年植被覆盖度变化趋势  
Fig.4 Changes in vegetation coverage in arsenic sandstone area of Yellow River basin from 2000 to 2022

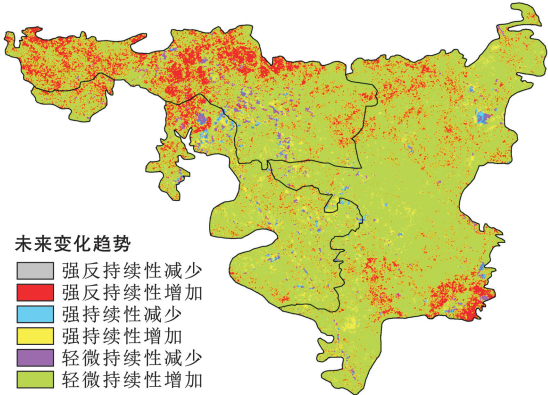
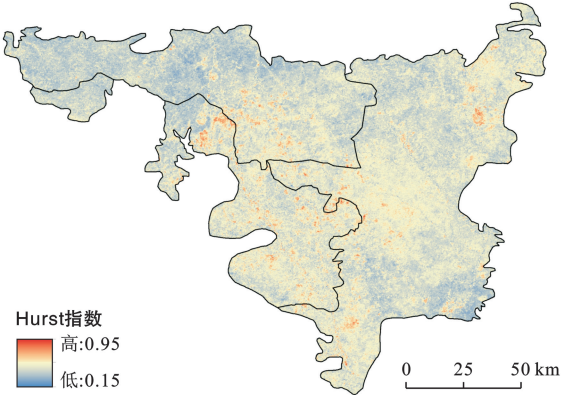


图 5 黄河流域砒砂岩区植被覆盖度未来变化趋势  
Fig.5 Future changes in vegetation coverage in arsenic sandstone area of Yellow River basin

3.2 植被覆盖度与气候变化协同响应

3.2.1 气候变化特征分析 气候变化是影响植被覆盖度变化的重要驱动因子,掌握黄河流域砒砂岩地区气候因子动态变化有助于进一步了解植被覆盖度变

化状况。

砒砂岩区气候干燥,降雨稀少(如图 6 所示)。2000—2022年砒砂岩区平均降水量在 269~453 mm,2012 年降水量最高,年降水量为 534 mm,2000 年降

水量最低,仅为 223 mm。砒砂岩区多年平均气温在 6.49~10.86 ℃,2012 年年均气温最低,为 7.53 ℃,2016 年年均气温最高,为 9.29 ℃。图 7 表明,砒砂岩区降水、气温在空间分布上都呈现“西北低,东南高”的分布状况,在此研究期间都呈上升态势,增长速率分别为 4.74%/a,0.44%/a。

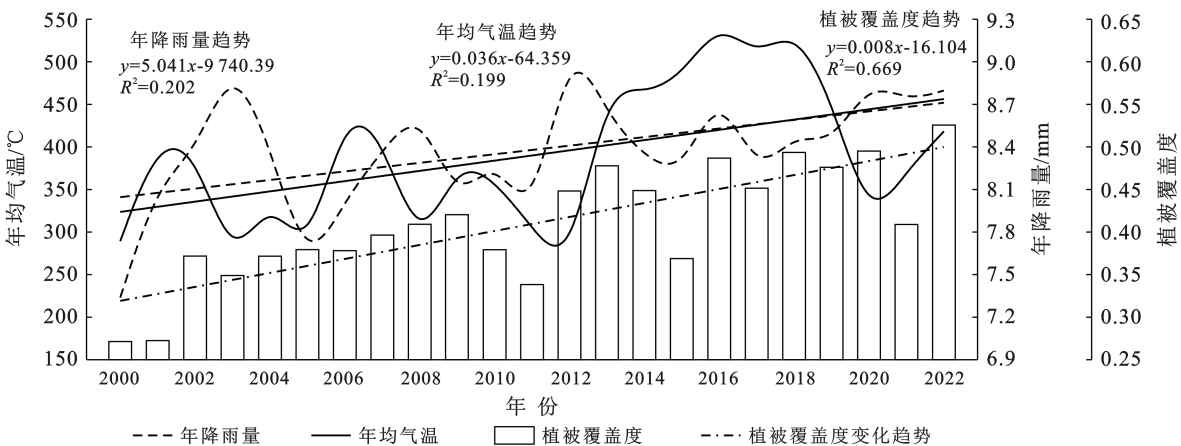


图 6 黄河流域砒砂岩区 2000—2022 年降水量、年均气温变化趋势

Fig.6 Changes in precipitation and annual average temperature in arsenic sandstone area of Yellow River basin from 2000 to 2022

3.2.2 植被覆盖度与气候因子相关分析 为探究砒砂岩区气候因素对植被覆盖度的影响,计算了 2000—2022 年植被覆盖度与降水、气温的偏相关系数,并基于此结果绘制降水—植被覆盖度及气温—植被覆盖度的显著性空间分布图(图 7)。由图 7 所示植被覆盖度与年降水量的偏相关系数在 -0.74~0.87 之间,均值为 0.05,正相关区域占总面积的 66.30%,负相关区域占总面积的 33.70%。从空间分布来看,

南北分异明显,研究区北部正相关占绝对优势,南部呈现正相关与负相关交错分布态势。分析降水—植被覆盖度的显著性特征,极显著正相关占全区总面积的 24.03%,多集中在砒砂岩裸露区位于达拉特旗、杭锦旗、东胜区一带。显著负相关集中分布在覆沙区南部地区的伊金霍洛旗和神木县一带,占到全区总面积的 10.70%。覆土区显著性分布繁多复杂,多以显著 ( $p<0.10$ ) 和不显著 ( $p<0.05$ ) 为主。

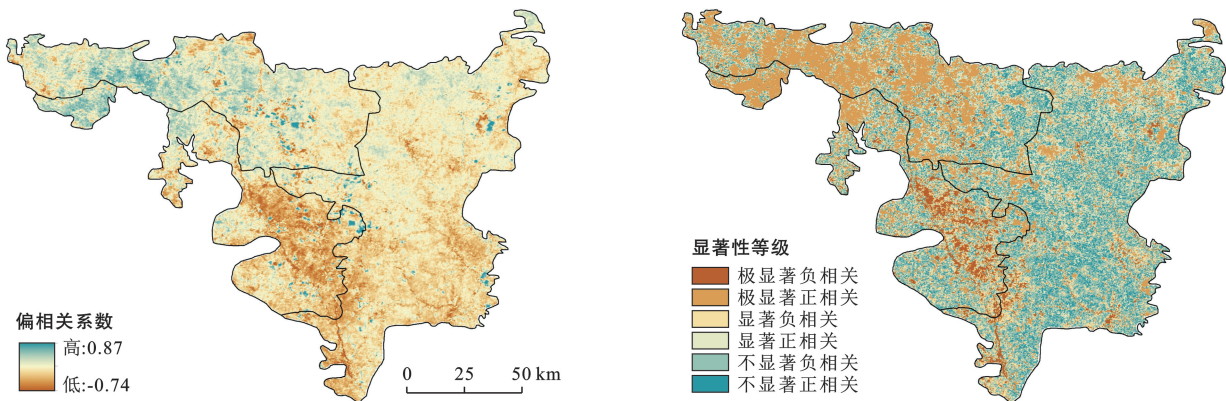


图 7 黄河流域砒砂岩区 2000—2022 年植被覆盖度与年降水量的偏相关系数及显著性等级

Fig.7 Partial correlation coefficient and significance level between vegetation coverage and annual precipitation in the arsenic sandstone area of the Yellow River basin from 2000 to 2022

由图 8 所示,砒砂岩区气温与植被覆盖度的偏相关系数在 -0.82~0.85 之间,偏相关系数均值为 0.30。在砒砂岩 3 个分区中正相关都占据绝对优势,占到了全区总面积的 92.19%,负相关零星分布在砒砂岩的边缘地带。分析气温—植被覆盖度的显著性特征,极

显著正相关集中分布在砒砂岩中部区域准格尔旗、康巴什区、神木县一带,占全区总面积的 37.72%,显著正相关集中分布在裸露区及覆土区东部,占全区总面积的 42.80%,不显著正相关在全区范围内零散分布,占到总面积的 11.66%。



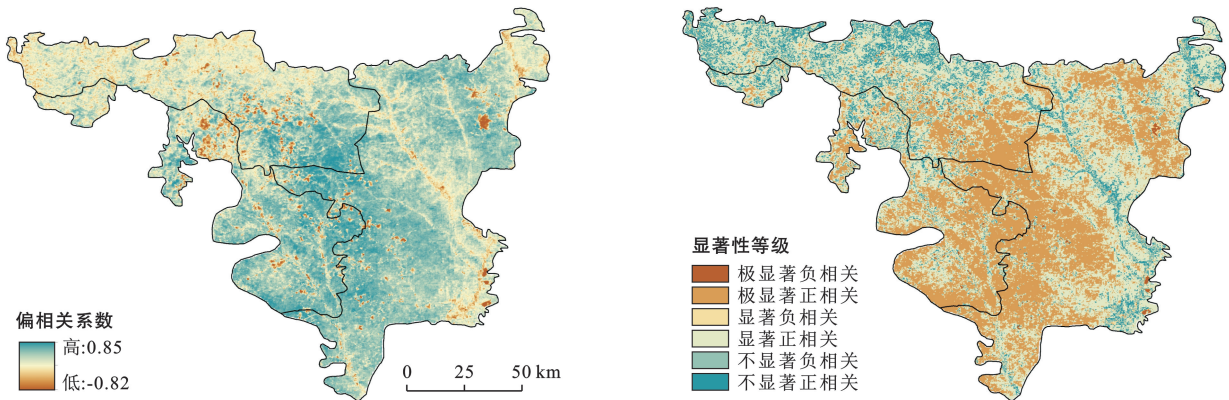


图 8 黄河流域砒砂岩区 2000—2022 年植被覆盖度与年均气温的偏相关系数及显著性等级  
Fig.8 Partial correlation coefficient and significance level between vegetation coverage and annual average temperature in arsenic sandstone area of Yellow River basin from 2000 to 2022

3.3 人类活动对植被覆盖度的影响

植被覆盖度的影响因素复杂多样,本研究假设只有两个气候因子对植被生长产生影响,利用残差分析法剔除气候因素影响,将结果视为分离出来的人类活动对 NDVI 变化的影响。2000—2022 年,人类活动对砒砂岩区植被覆盖度的影响范围在-0.43~0.68,均值为 0.004,表明研究期间人类活动对植被覆盖度以正向影响为主导方向,改善程度大于破坏程度。从时间尺度来看(图 9),植被覆盖度残差呈现逐年增长趋势。研究期间增长率为 0.084/10 a,在 2000—2011 年人类活动多以负面影响为主,增长率为 0.053/10 a,2012—2022 年多以正向影响为主,增长率为 0.017/10 a。残差最小值出现在 2001 年(-0.14),最大值出现在 2020 年(0.11)。从空间分布来看(图 10),砒砂岩区多年残差均值在-0.032~0.015 范围内,在达拉特旗、东胜区、伊金霍洛旗、神木县及准格尔旗的少量区域人类活动对植被覆盖度呈现正向影响,在准格尔旗西侧、府谷县以西区域人类活动对植被覆盖度呈现负面影响。

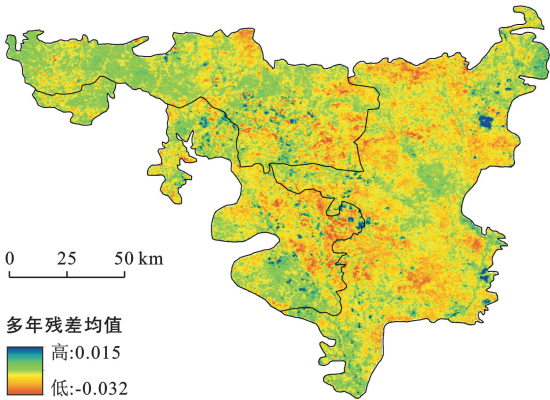


图 10 人类活动对黄河流域砒砂岩区 2000—2022 年植被变化影响的空间分布  
Fig.10 Spatial distribution of impact of human activities on vegetation changes in arsenic sandstone area of Yellow River basin from 2000 to 2022

4 讨论

4.1 砒砂岩区植被覆盖度时空变化特征

自 20 世纪末,国家政府在黄河流域砒砂岩区大力倡导“退耕还林项目工程”“封山禁牧项目工程”“沙棘生态工程”“天然林保护工程”等一系列重大生态恢复保护措施,使砒砂岩区地表植被得到了显著改善<sup>[21]</sup>。本研究分析了 2000—2022 年砒砂岩区植被覆盖度的时空变化特征。研究结果发现,砒砂岩区植被覆盖度均值自 2000 年的 0.27 升至 2022 年的 0.52。全区范围内有将近 90% 的区域植被覆盖得到了改善,表明经过约 20 a 的治理,砒砂岩区植被恢复效果明显,这与王晓蕾等<sup>[22]</sup>在黄河流域利用 GEE 平台反演植被覆盖度时空变化趋势得到的研究结论一致。砒砂岩区植被覆盖度高值区集中分布在东南部,植被覆盖度低值区多在砒砂岩裸露区,这与杜睿哲<sup>[23]</sup>和邢丽珠等<sup>[24]</sup>研究结果一致,其主要原因为研究区东南部海拔较低,土壤类型多为黄绵土,气候宜人,水源

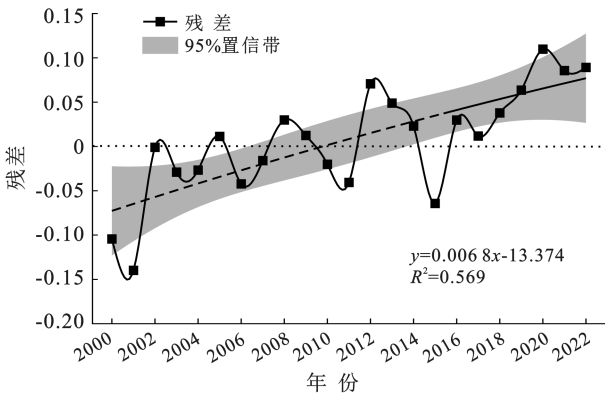


图 9 人类活动对黄河流域砒砂岩区 2000—2022 年植被覆盖度影响的残差变化趋势  
Fig.9 Residual variation trend of vegetation coverage affected by human activities in arsenic sandstone area of Yellow River basin from 2000 to 2022



丰富,适宜植被生长。与此相对应的砒砂岩裸露区,该区域岩层裸露,地表保水能力差,生境质量恶劣,气候干燥,植被种类单一且稀少,因此植被覆盖度较低。并在此基础上,利用 Hurst 指数模型对砒砂岩区未来植被覆盖度发展趋势进行预测分析,得出 Hurst 均值(0.45)小于 0.50。因此砒砂岩区植被覆盖在未来有退化风险,仍然需要加强保护监管力度。

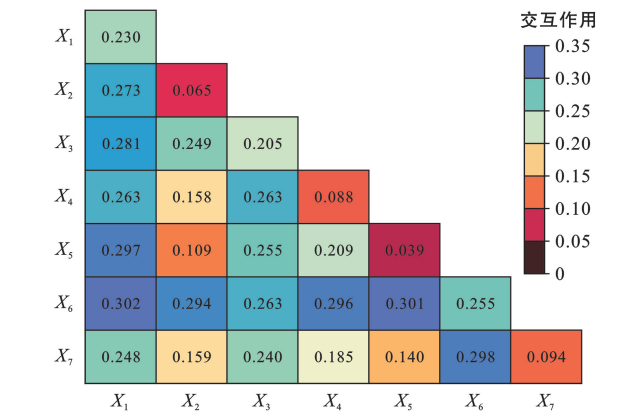
4.2 气候因素对植被覆盖度时空演变的影响

气候条件是影响植被生长活力的决定性因素,主要体现在植被生长活动过程中与水热条件进行的复杂交互影响机制,以此形成明显的区域分异效果。在一定条件范围内,适度的增温会对植被活动产生积极作用。砒砂岩区气候干燥,地质干旱,年均降水量为 350 mm,远远小于中国平均降水量(628 mm),致使砒砂岩区植被覆盖度低,生态系统脆弱。本研究得出砒砂岩区植被覆盖度对降水量偏相关系数均值为 0.05,对年均气温的偏相关系数为 0.30,表明气温对植被覆盖度影响力更强。

4.3 人类活动对植被覆盖度时空演变的影响

经济的发展,城市的扩张导致植被生长空间不断被挤压,大量自然地表植被转化为建设用地,同时一些人类活动间接导致中国植被退化的原因也不容忽视。人类活动在破坏自然地表植被的同时,所采取的退耕还林、退牧还草、天然林保护工程等措施对植被覆盖度呈改善效果显著。本研究中得出 2000—2011 年砒砂岩区人类活动多以负面影响为主,2012—2022 年人类活动多以正面影响为主,但整体来看,人类活动对植被覆盖度的影响呈现积极的改善作用,与王玉涛<sup>[25]</sup>、皮贵宁等<sup>[16]</sup>人研究结果一致。2000 年后黄河流域砒砂岩区大力开展生态工程保护措施,研究区植被覆盖度略有提升,生境质量改善明显。但由于自然气候等条件存有差异,人类活动方式各不相同,致使影响植被覆盖度的驱动机理复杂多样,且研究结果难以量化。从自然因素和人为因素筛选 7 项因子,基于地理探测器,揭示不同因子对砒砂岩区植被覆盖度的作用关系。通过因子探测器结果显示各个驱动因子大小顺序为:年均气温(25.48%)>地表覆盖(22.98%)>地表高程(20.53%)>年降水量(9.39%)>人口密度(8.21%)>土地利用类型(6.47%)>国内生产总值(3.90%),且皆通过显著性水平检验。交互探测结果显示(图 11),年均气温∩地表覆盖、年均气温∩国内生产总值的复合作用最高,贡献率均在 30%以上。单因子影响中,年均气温对砒砂岩区植被覆盖度的贡献率最高,进一步证实气温为影响植被覆盖度变化的主导因素,与马晓妮<sup>[26]</sup>

得出的结论(降雨为影响植被覆盖度变化的主要因素)相反,其原因可能是研究过程中所选择的数据、研究时段不同所导致。



注: X<sub>1</sub>:地表覆盖; X<sub>2</sub>:土地利用类型; X<sub>3</sub>:地表高程; X<sub>4</sub>:人口密度; X<sub>5</sub>:国内生产总值; X<sub>6</sub>:年均气温; X<sub>7</sub>:年降水量。

图 11 黄河流域影响植被覆盖度的主导因子交互探测结果  
Fig.11 Interactive detection results of dominant factors affecting vegetation coverage in Yellow River basin

5 结论

(1) 2000—2022 年黄河流域砒砂岩区植被覆盖度呈现波动增长趋势,多年增长率为 4%/a,但整体水平相对较低。研究期间植被覆盖度由中低植被覆盖向中植被覆盖转变,植被覆盖度还存有改善空间。从空间分布来看,砒砂岩 3 个区呈现明显的空间分异性,植被覆盖度水平表现为:覆土区>覆沙区>裸露区。

(2) 砒砂岩区植被覆盖度变异系数在 0.02~0.72 之间,均值为 0.20,植被稳定性相对较强,变异系数高值区多集中在经济繁荣,人类活动密切的区域,表明人类活动是影响植被覆盖度波动的主要影响因素。利用 Hurst 指数预测分析,该区有 74.25%的区域 Hurst 值小于 0.5,植被覆盖度在未来面临缩减风险,仍需保持警惕。

(3) NDVI 与气温及降水整体上都呈现正偏相关关系,系数分别为 0.30,0.05,气温与植被覆盖度的显著性面积高于降水,表明在砒砂岩区气温对植被覆盖度的影响力更强。

(4) 利用残差分析可得,黄河流域砒砂岩区在 2000—2011 年人类活动多以负面影响为主,平均增长率为 0.053/10 a, 2012—2022 年则以正向影响为主,平均增长率为 0.017/10 a。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 马泽清,王辉民,杨风亭,等.基于长期观测研究支撑亚热

- 带红壤丘陵区森林生态系统恢复与可持续发展[J].中国科学院院刊,2020,35(12):1525-1536.
- [2] 饶品增,王义成,王芳.三江源植被覆盖区 NDVI 变化及影响因素分析[J].草地学报,2021,29(3):572-582.
- [3] 韩雪莹.羽翼袋沙障防护机理与防沙效益研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- [4] 邱燕宁,任世钰,王鑫,等.基于无人机影像的草方格生态恢复区植被空间格局演化研究[J].生态学报,2019,39(24):9058-9067.
- [5] 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.
- [6] Li Peng, He Zhengwei, He Dong, et al. Fractional vegetation coverage response to climatic factors based on grey relational analysis during the 2000—2017 growing season in Sichuan Province, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2020,3:1170-1190.
- [7] 童珊,曹广超,闫欣,等.祁连山南坡 2000—2020 年植被覆盖时空演变及其驱动因素分析[J].山地学报,2022,40(4):491-503.
- [8] 王晓琪,赵雪雁.人类活动对国家公园生态系统服务的影响:以祁连山国家公园为例[J].自然资源学报,2023,38(4):966-982.
- [9] 许红梅,高清竹,江源,等.黄河中游砒砂岩地区长川流域植被盖度及其动态分析[J].中国沙漠,2005,25(6):88-93.
- [10] 张喜旺,秦奋.砒砂岩地区降雨与植被耦合关系对侵蚀产沙的影响[J].地理研究,2016,35(3):513-524.
- [11] 黎铭,张会兰,孟铖铖,等.皇甫川流域 2000—2015 年植被 NDVI 时空变化特征[J].林业科学,2019,55(8):36-44.
- [12] 董晓宇.裸露砒砂岩区土壤—基岩复合坡面水分运移过程及侵蚀特征研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- [13] 李玉辰,李宗省,张小平,等.祁连山国家公园植被时空变化及其对人类活动的响应[J].生态学报,2023,43(1):219-233.
- [14] 黄雅君,周伟,马明国.西南地区破碎地表空间异质性刻画与空间尺度关系初探[J].遥感学报,2023,27(3):802-809.
- [15] 程春香.2000—2020 年黑龙江省陆地植被 NPP 的时空演变及驱动力影响研究[D].黑龙江 哈尔滨东:北林业大学,2022.
- [16] 皮贵宁,贺中华,游漫,等.2001—2020 年贵州省气候变化及人类活动对植被变化的影响[J].水土保持学报,2022,36(4):160-167.
- [17] 辛宇,孙梦鑫,张岳,等.2000—2020 年四川省植被覆盖时空变化特征及其气候驱动因子[J].水土保持通报,2022,42(4):312-319.
- [18] 贾志峰,刘鹏程,刘宇,等.气候变化和人类活动对松辽流域植被覆盖的影响[J].生态环境学报,2023,32(1):1-10.
- [19] 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.
- [20] 邓兴耀,刘洋,刘志辉,等.中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J].生态学报,2017,37(9):2994-3008.
- [21] 魏艳红.延河与皇甫川流域典型淤地坝淤积特征及其对输沙变化的影响[D].陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2017.
- [22] 王晓蕾,石守海.基于 GEE 的黄河流域植被时空变化及其地形效应研究[J].地球信息科学学报,2022,24(6):1087-1098.
- [23] 杜睿哲,李文栋,高文浩,等.气候、地表覆被变化对砒砂岩区风蚀时空变化的影响[J].水土保持研究,2023,30(05):31-40.
- [24] 邢丽珠,张方敏,邢开成,等.基于 RWEQ 模型的内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀变化特征及归因分析[J].中国沙漠,2021,41(5):111-119.
- [25] 王玉涛.2000 年以来人类活动对中国植被净初级生产力的影响[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2020.
- [26] 马晓妮,任宗萍,谢梦瑶,等.砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析:基于地理探测器[J].生态学报,2022,42(8):3389-3399.