

# 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

张乐艺<sup>1</sup>, 李霞<sup>2</sup>, 冯京辉<sup>1</sup>, 饶日光<sup>3</sup>, 何天英<sup>1</sup>, 陈瑜<sup>1</sup>

(1.长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2.长安大学 土地工程学院, 陕西 西安 710054; 3.国家林业和草原局 西北调查规划设计院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** [目的] 分析黄河流域NDVI时空变化特征,探究NDVI变化对气候和人类活动的响应机制,为制定合理的生态工程提供科学依据,为实现黄河流域生态保护和高质量发展提供保障。[方法] 基于MODIS NDVI数据,辅以降水和气温数据,采用一元线性趋势分析、Hurst指数、偏相关分析及残差分析方法,对2000—2018年黄河流域NDVI时空变化特征进行分析,并探讨了NDVI变化对气候和人类活动的双重响应。[结果] ①黄河流域NDVI呈现波动增加趋势,总增速为6.8%/10 a,NDVI在东南部及西部较高,北部及西北部较低,由东南向西北部减少,下游最高,中游次之,上游最低;整体上,以东亚季风生态地理区和西北干旱生态地理区界线(鄂尔多斯市—毛乌素沙地—庆阳市—平凉市—定西市)和青藏高原生态地理区和西北干旱生态地理区及东亚季风生态地理区界线(西宁市—甘南市—定西市)为界呈V字型分布。②NDVI整体变化趋势以改善为主,反持续性强于持续性,且表现出较强的弱持续性,其中改善区约占62.32%,主要呈带状集中分布。在中上游地区,在鄂尔多斯市—毛乌素沙地—庆阳市—平凉市—定西市—西宁市—甘南市、太原盆地—临汾盆地—关中平原及运城盆地—三门峡两两界线间的条带区域基本为改善区,而退化区域以中下游为主,呈零散分布。③NDVI与降水和气温呈正相关,且与降水的偏相关强度稍大于气温,流域约76.7%的地区NDVI残差呈增长的趋势,人类活动整体对NDVI增加的影响以促进为主,促进作用大小顺序为:中游>上游>下游。[结论] 黄河流域NDVI变化受气候和人类活动共同影响,具有空间异质性,适度的生态工程及农业生产活动对植被恢复有重要作用。

**关键词:** NDVI; 时空变化; 趋势分析; Hurst指数; 气候因素; 残差分析; 人类活动; 黄河流域

**文献标识码:** A **文章编号:** 1000-288X(2021)05-0276-11 **中图分类号:** S157.2, X87, TP79

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20210809.001; 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]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 276-286.

## Spatial-temporal Changes of NDVI in Yellow River Basin and Its Dual Response to Climate Change and Human Activities During 2000—2018

Zhang Leyi<sup>1</sup>, Li Xia<sup>2</sup>, Feng Jinghui<sup>1</sup>, Rao Riguang<sup>3</sup>, He Tianying<sup>1</sup>, Chen Yu<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi

710054, China; 2. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3. Northwest Survey and Planning Institute of State Forestry and Grassland Administration, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** [Objective] Spatial-temporal changes of normalized difference vegetation index (NDVI) in the Yellow River basin were analyzed and its response mechanism to climate change and human activities was investigated in order to provide references for appropriate ecological engineering and guarantee ecological protection and high-quality development in the Yellow River basin. [Methods] In conjunction with MODIS NDVI, precipitation, and temperature data, we used unary linear trend analysis, Hurst index, partial correlation

收稿日期: 2021-04-20

修回日期: 2021-05-23

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目“遥感信息提取与地质勘查应用”(300102278206)

第一作者: 张乐艺(1997—), 男(汉族), 河南省商丘市人, 硕士研究生, 研究方向为生态遥感。Email: zly9707@163.com。

通讯作者: 李霞(1977—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事GIS与生态遥感研究。Email: lixia666@chd.edu.cn。

analysis, and residual analysis methods to analyze the spatial-temporal changes of NDVI in the Yellow River basin between 2000 and 2018. The NDVI's dual response mechanism to climate and human activities was discussed. [Results] ① NDVI in the Yellow River basin showed increased volatility over time with an overall growth rate of 6.8%/10 year. The NDVI was higher in the southeast and west, and lower in the north and northwest. The NDVI decreased from southeast to northwest. The NDVI was highest in the downstream region, intermediate in the midstream region, and lowest in the upstream region. NDVI also had a V-shaped distribution bounded by the East Asian monsoon eco-geographical area, the northwest arid eco-geographical area (Erdos-Maowusu Sandy Land-Qingyang-Pingliang-Dingxi), the Qinghai-Tibet Plateau eco-geographical area and zone bounded by the northwest arid eco-geographical area, and the East Asian monsoon eco-geographical area (Xining-Gannan-Dingxi); ② The overall trend of the NDVI showed improvement. Its anti-continuity was stronger than continuity with great weak continuity. The improvement area accounted for about 62.32% of the total area, and was distributed as a strip-shaped area in the middle and upper reaches of the Ordos-Mowsu Sandy Land-Qingyang-Pingliang-Dingxi-Xining-Gannan, Taiyuan Basin-Linfen Basin-Guanzhong Plain, and the zone bounded by Yuncheng Basin-Sanmenxia. The degraded areas were dominated by the middle and lower reaches with scattered distribution; ③ The NDVI was positively correlated with precipitation and air temperature, and the intensity of the partial correlation with precipitation was slightly larger than that of air temperature. The NDVI residuals in about 76.7% of the basin were increasing. The overall impact of human activities on NDVI was positive, and was greatest in the midstream region, followed by the upstream region, and finally the downstream region. [Conclusion] NDVI changes in the Yellow River basin are influenced by climate and human activities and exhibit spatial heterogeneity. Appropriate ecological engineering and agricultural production activities play an important role in vegetation restoration.

**Keywords: NDVI; spatial-temporal changes; trend analysis; Hurst index; climatic factors; residual analysis; human activities; Yellow River basin**

随着全球气候变化和人类活动加剧,生态系统已经遭受严重破坏,土地退化、水土流失、荒漠沙漠化等一系列生态环境问题频发<sup>[1-2]</sup>。植被作为全球陆地生态系统的主体,是生态监测、生态风险及脆弱性评价的重要指标,在水土保持、维持气候及生态系统稳定性方面具有重要作用,植被的改善有助于提高水源涵养和水土保持功能,对植被的时空变化趋势监测在全球气候变化背景下的陆地生态系统研究中具有重要意义<sup>[3-5]</sup>。

归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与生物量、叶面积指数有较高的相关性,能够很好地反映地表植被的繁茂程度,可以在一定程度上代表地表植被覆盖的变化<sup>[5]</sup>。目前,诸多学者利用 NDVI 或植被覆盖变化以及影响因素做了大量工作,并取得不少进展和突破。已有研究表明,气温和降水等气候因素对植被的生长有着重要作用,不同地区水热条件和植被类型不同,植被变化及其对气候变化的响应也存在很大空间差异<sup>[5-11]</sup>。除此之外,人类活动也会对植被生长产生抑制或促进的影响,城市化发展导致大量农田和林地被建设用地侵占,滥砍滥伐会导致区域植被减少、生态退化<sup>[10,12-13]</sup>;而退耕还林(草)、天然林保护及自然保护区等生态工程建设

可以改善区域生态环境,促进植被覆盖的增加<sup>[11-16]</sup>。

黄河流域位于中国干旱、半干旱和半湿润地区,生态环境脆弱,是中国重要的生态屏障,对该地区的植被覆盖动态变化进行监测,在区域生态环境保护中十分重要。以往有诸多研究着眼于黄河流域(含流域内典型区域)展开分析,得出气候变化深刻影响着黄河流域植被覆盖的变化,且多年来的生态工程建设也极大地改善了流域内的植被状况<sup>[12-13,17-24]</sup>。孙睿等<sup>[25]</sup>和杨胜天等<sup>[26]</sup>基于 AVHRR/NDVI 数据,发现 20 世纪 80—90 年代,黄河流域植被处于上升趋势,汛期降水量对植被变化起主导作用,生态保护建设对植被起到促进作用。李春晖等<sup>[27]</sup>基于 8 km 的 AVHRR/NDVI 研究发现黄河流域各分区年均 NDVI 都呈现增加趋势,降水、径流与 NDVI 年内变化呈现明显的正相关。刘宪锋等<sup>[28]</sup>基于 MODIS-NDVI 数据,从 3 个尺度发现近 12 a 三江源区植被覆盖整体呈改善趋势,且反向持续特征明显,而三江源区植被覆盖的增加主要归因于气候暖湿化以及生态保护工程的实施。赵安周等<sup>[29]</sup>基于 GIMMS NDVI 数据研究得出 1982—2015 年黄土高原 NDVI 呈增加趋势,但未来有部分地区会退化;NDVI 受降水的影响强于气温,而生态工程在植被恢复中扮演了重要角

色。李双双等<sup>[30]</sup>基于 MODIS-NDVI 数据得出陕甘宁地区退耕还林还草以来植被以轻微改善为主,受人类活动和气候变化共同影响,且人类活动更明显。

以往研究中较多从黄河流域局部地区进行研究,对整个黄河流域近年来的 NDVI 趋势及驱动因素研究较少,同时多基于 NDVI 数据分析植被对气候变化的响应,对人类活动的影响关注也较少,且以定性描述分析为主。本文基于 NDVI 数据、降水及气温等数据,采用一元线性趋势分析、Hurst 指数、偏相关分析及残差分析,对黄河流域 NDVI 的时空演变规律及未来变化趋势进行分析,并从气候和人类活动两个方面探讨 NDVI 变化的驱动因素,以加深对植被—气候—人类活动之间的相互关系的认识,为制定合理的生态工程、土地利用及生态保护策略等提供科学依据,实现黄河流域生态保护和高质量发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄河发源于青藏高原,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省区,最后注入渤海,流域介于  $96^{\circ}$ — $119^{\circ}$ E,  $32^{\circ}$ — $42^{\circ}$ N 之间,东西长约 1 900 km,南北宽约 1 100 km,流域总面积达  $7.95 \times 10^5$  km<sup>2</sup>左右,位于中国干旱、半干旱和半湿润地区,全年气温差异明显,年平均降水量为 200~600 mm。按照中央气象局对全国的气候区划,黄河流域主要属于南温带、中温带和高原气候区。流域地势西高东低,河源至内蒙古河口镇为上游地区,河段落差较大;内蒙古河口镇至河南省桃花峪为中游地区,地形为黄土地貌,水土流失严重;河南省桃花峪以下的河段为下游地区,主要由黄土冲击平原形成(图 1)。

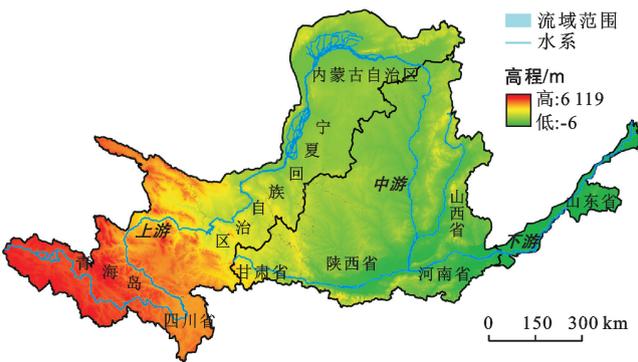


图 1 黄河流域地理位置

### 1.2 研究数据

NDVI 数据来源于美国 NASA (<https://earthdata.nasa.gov/>) 的 MODIS 植被指数产品数据 MOD13Q1。数据空间分辨率为 250 m,时间分辨率

为 16 d,时间跨度为 2000 年 1 月至 2018 年 12 月,经过格式转换、坐标转换、数据裁剪及重采样为 1 km 分辨率,然后采用最大值合成法获取逐月 NDVI 数据,有效地去除云、大气和太阳高度角等产生的影响,最后将一年内 NDVI 最大值数据作为年 NDVI 数据,消除极端年份气候异常对植被生长状态的影响。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),将全国 900 个站点 2000 年 1 月至 2018 年 12 月各年份逐月数据取均值作为年气象数据,采用专业 ANUSPLIN 软件进行插值、裁剪得到研究区 2000—2018 年 1 km 分辨率的温度和降水栅格数据。DEM 数据来源于中科院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),该数据集基于最新的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)V4.1 数据经重采样生成,采用 WGS84 椭球投影,分辨率为 1 km。植树造林及粮食产量数据分别来自陕西和宁夏两省统计年鉴。

### 1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析 一元线性回归分析可以模拟每个栅格的变化趋势,以单个像元时间变化特征反映整个空间变化规律,综合反映区域时空格局演变<sup>[31-32]</sup>。其计算公式如下:

$$NDVI = a \times year + b \quad (1)$$

式中: $a$  为像元 NDVI 回归方程的斜率 Slope,若  $a$  为正,表示 NDVI 呈增加趋势, $a$  为负,表示 NDVI 呈减少趋势; $year$  代表年份, $b$  代表回归方程的截距<sup>[33-34]</sup>。

趋势显著性用  $F$  检验,其计算公式为:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (2)$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

式中: $U$  和  $Q$  分别指误差平方和及回归平方和; $y_i$  是第  $i$  年的 NDVI 值; $\hat{y}_i$  为其回归值; $\bar{y}$  为 NDVI 平均值; $n$  为研究年数<sup>[33]</sup>。

1.3.2 Hurst 指数 自然界中具有长期依赖性的时间序列是普遍存在的,Hurst 指数是定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法之一,最早由英国水文学家 Hurst 提出,在水文学、经济学、气候学、地质等领域有着广泛应用<sup>[35]</sup>。其计算原理如下:

对于任意正整数  $\tau \geq 1$ ,定义均值序列  $\{\xi(t)\}$ :

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi(t) \quad (\tau = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

(1) 离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^{\tau} [\xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau}] \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (6)$$

(2) 极差:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (\tau = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

(3) 标准差:

$$S(\tau) = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\tau = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

引入无量纲的比值  $R/S$ , 若存在  $H$  使得  $R/S = (c\tau)^H$  成立, 则说明  $\{\xi(t)\}$  存在 Hurst 现象,  $H$  为 Hurst 指数。在双对数坐标系中  $[\ln \tau, \ln(R/S)]$  使用最小二乘法拟合, 求得像元 Hurst 指数。Hurst 指数取值范围:

(1) 若  $0 < H < 0.5$ , 表明植被覆盖度时间序列具有反持续性, 过去变量与未来趋势呈负相关, 序列有突变跳跃特性,  $H$  值越接近于 0, 反持续性越强;

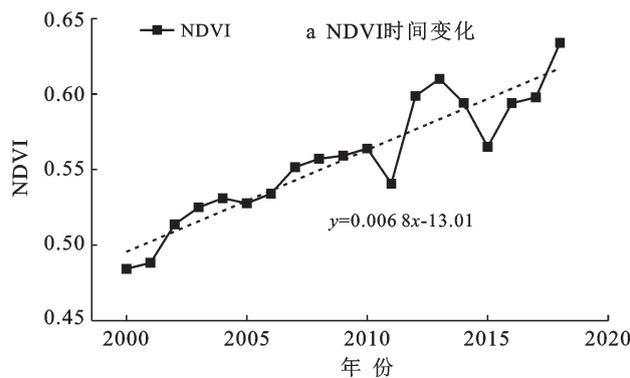
(2) 若  $H = 0.5$ , 表明植被覆盖度时间序列为互相独立的随机序列;

(3) 若  $0.5 < H < 1$ , 表明植被覆盖度时间序列具有长期相关特性, 过程具有持续性,  $H$  值越接近于 1, 持续性越强。

1.3.3 相关性分析 偏相关分析是指两个变量同时与第 3 个变量相关时, 将第 3 个变量的影响剔除, 只分析另两个变量之间相关程度的过程<sup>[34]</sup>。计算公式为:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} - r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (9)$$

式中:  $r_{xy,z}$  为偏相关系数;  $r_{xy}, r_{xz}, r_{yz}$  分别为  $x, y, z$  两两间的简单相关系数。  $r_{xy,z}$  大于 0, 则两变量呈正相关,  $r_{xy,z}$  小于 0, 则两变量呈负相关。



1.3.4 残差分析 通过剔除 NDVI 长时间序列变化中降水和气温因素的影响来剥离开植被覆盖变化中自然因素和人为因素。本文利用剔除异常值的 NDVI 和降水量和气温数值做回归分析, 计算出 NDVI 的预测值和真实值之间的差值, 以此作为人为因素对植被覆盖变化的影响, 即残差趋势法<sup>[36]</sup>。该方法在研究中得到了广泛的应用, 其表达式如下:

$$\text{NDVI 预测值} = aT + bP + c \quad (10)$$

$$\text{NDVI 残差} = \text{NDVI 真实值} - \text{NDVI 预测值} \quad (11)$$

式中: NDVI 真实值为遥感影像中 NDVI 值, NDVI 预测值指假设没有人类活动影响, 基于 NDVI 以及气温和降水量时间序列数据, 以 NDVI 为因变量、以气温和降水量为自变量, 建立二元线性回归模型得到的 NDVI 预测值;  $T, P$  分别为气温、降水;  $a, b, c$  为模型参数<sup>[16]</sup>。

通过公式(1)计算 NDVI 残差的变化趋势, 趋势率为正, 表示人类活动对 NDVI 起促进作用, 趋势率为负, 表示人类活动对 NDVI 起抑制作用。

## 2 结果与分析

### 2.1 NDVI 时空变化分析

(1) 时间变化特征。2000—2018 年黄河流域 NDVI 整体呈现出波动上升的趋势(图 2a), NDVI 值介于 0.484 305, 0.633 907 之间, 总体增速为 6.8%/10 a。大致分为 3 个阶段, 2000—2011 年为第一阶段, NDVI 增加较缓; 2011—2013 年为第二阶段, 先上升后下降; 2015—2018 为第三阶段, 持续增加, 增速较快。在增加过程中 2011 年和 2015 年骤然减少, 分别为 0.540 684, 0.565 101, 但较 2000 年(0.484 305)而言仍表现为增加。

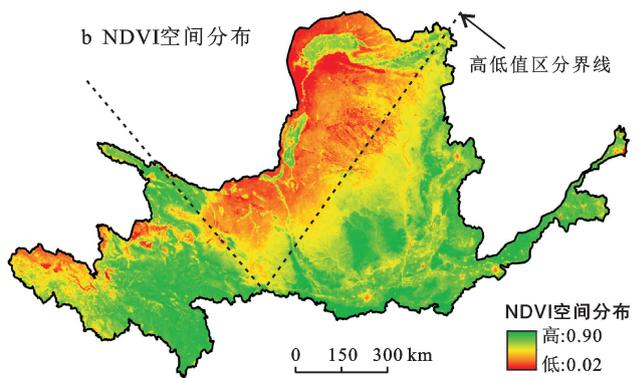


图 2 2000—2018 年黄河流域 NDVI 时间变化特征及空间分布

(2) 空间分布及变化趋势。通过对 2000—2018 年多年平均 NDVI 值计算得到 19 a NDVI 空间分布图(图 2b), 整体上, 黄河流域沿黄河干流和支流区域具

有较高的植被; NDVI 值东南部及西部较高, 这些地区主要为平原、盆地及山地地貌, 植被状况较好, 北部及西北部主要为黄土高原和荒漠, NDVI 较低。由东

南向西北部减少,空间分布存在两条界线(图 2b):  
①东亚季风生态地理区和西北干旱生态地理区界线,界线以北为较低值区,界线以南为较高值区,大致沿鄂尔多斯—毛乌素沙地—庆阳—平凉—定西—西—线,和南温带和中温带分界线、温带草原和温带阔叶林分界线有一定重合;②青藏高原生态地理区和西北干旱生态地理区及东亚季风生态地理区界线,大致沿西宁—甘南—定西—西—线,和高原气候区和中温带及南温带、青藏高原高寒植被区和温带草原及温带阔叶林分界线有一定重合。两条界线呈 V 字型, V 字型两侧为较高值区, V 字内为较低值区。

表 1 2000—2018 年黄河流域 NDVI 空间分布分级统计

NDVI 值	黄河流域		上游		中游		下游	
	像元数/个	比例/%	像元数/个	比例/%	像元数/个	比例/%	像元数/个	比例/%
<0.1	3 161	0.4	2 967	0.7	0	0	130	0.4
0.1~0.5	294 172	36.5	218 349	50.8	73 180	21.2	1 699	5.4
0.5~0.9	511 394	63.1	208 625	48.5	107 590	78.8	29 730	94.2

为更好的评价 NDVI 变化情况,参照已有研究<sup>[30]</sup>,结合本文实际,将 Slope 划分为严重退化( $Slope \leq -0.03$ )、中度退化( $-0.03 < Slope \leq -0.02$ )、轻微退化( $-0.02 < Slope \leq -0.01$ )、基本不变( $-0.01 < Slope \leq 0.01$ )、轻微改善( $0.01 < Slope \leq 0.02$ )、中度改善( $0.02 < Slope \leq 0.03$ )、明显改善( $Slope > 0.03$ )。从一元线性趋势分析结果(图 3a)和 NDVI 变化趋势统计(表 2)发现,黄河流域植被 NDVI 整体以改善为主,改善区约占 62.32%,改善区主要呈带状分布,大致存在 3 条界线:①沿鄂尔多斯—毛乌素沙地—庆阳—平凉—定西—西—西宁—甘南;②太原盆地—临汾盆地—关中平原;③运城盆地—三门峡,两两界线间的条带区域基本为改善区。退化面积仅占 2.16%,以中下游城市地区为主,在兰州、宁夏平原、河套平原、包头至呼和浩特、太原盆地、关中盆地、临汾盆地、运城盆地、晋城、洛阳及山东境内都有零散分布,或与城市

通过 NDVI 分布进一步统计(表 1),NDVI 值低于 0.1 的区域占 0.4%,主要分布在上游的冰川湖泊、裸岩荒漠和沙地沙漠等,主要以草原和高寒植被为主。NDVI 值在 0.1~0.5 之间的有 36.5%,在 0.5~0.9 之间有 63.1%。其中下游 NDVI 最高,均值约为 0.7,小于 0.1 的区域仅占 0.4%,0.1~0.5 的区域占 5.4%,0.5~0.9 的区域占 94.2%;中游次之,均值约为 0.6,不存在 NDVI 小于 0.1 的区域,0.1~0.5 的区域占 21.2%,0.5~0.7 的区域占 78.8%,0.7~0.9 的区域占 34.9%;上游最低,均值约为 0.5,小于 0.1 的区域占 0.7%,0.1~0.5 的区域占 50.8%,0.5~0.9 的区域占 48.5%。

发展、土地利用变化有一定的关系。明显改善面积占 0.09%,中度改善面积占 6.72%,轻微改善面积占 55.51%,中上游地区改善面积占比较多且较为集中,主要包括黄河源区南部和东部、青海黄河两岸、甘肃南部、祁连山区、宁夏平原、河套平原、黄土高原沟壑区、关中平原北部、山西西部等地;而下游主要分布在三门峡和山东等地。基本不变的区域占 35.52%,主要分布在黄河源区中部、鄂尔多斯高原、毛乌素沙地、关中平原东部及下游地区。在黄河源区及鄂尔多斯高原等地,NDVI 改善、退化及基本不变等趋势交织零星分散在一起,可能与植被本身生长情况较为复杂,加之自然条件与区域内部差异有关,在通过对 NDVI 线性趋势显著性检验(图 3b),大部分地区通过了显著性检验,其中显著改善的区域占显著区域的 96.4%,显著退化的区域仅占 3.6%,说明整体上 NDVI 呈增加的趋势。

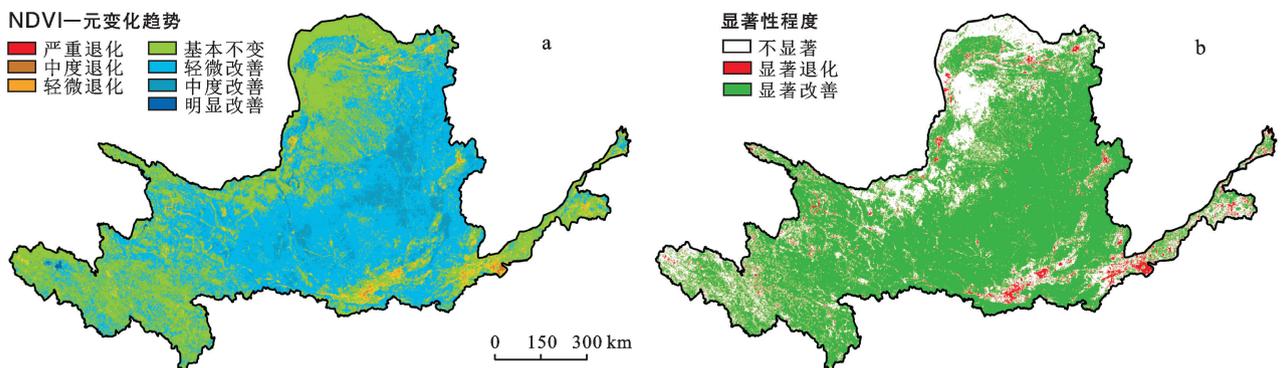


图 3 2000—2018 年黄河流域 NDVI 空间变化趋势(a)及显著性检验(b)

表 2 2000—2018 年黄河流域 NDVI 变化趋势统计

NDVI 变化趋势	黄河流域		上游		中游		下游	
	像元数/个	比例/%	像元数/个	比例/%	像元数/个	比例/%	像元数/个	比例/%
严重退化	1 097	0.010	208	0.003	192	0.003	696	0.136
中度退化	38 827	0.300	10 733	0.150	14 473	0.263	13 598	2.667
轻微退化	240 082	1.850	83 802	1.200	107 590	1.951	48 516	9.515
基本不变	4 594 444	35.520	3 399 156	49.046	867 420	15.732	322 917	63.328
轻微改善	7 179 909	55.510	3 271 643	47.206	3 813 533	69.168	120 199	23.572
中度改善	868 668	6.720	154 480	2.229	710 143	12.881	3 877	0.760
明显改善	11 722	0.090	11 514	0.166	96	0.002	112	0.022

(3) 持续性分析。对 19 a NDVI 进行持续性分析统计(表 3),Hurst 指数介于 0.158 064,0.948 973, 平均值为 0.49, Hurst 指数小于 0.5 的区域占比 59.8%, 大于 0.5 的占比 40.2%, 故 NDVI 变化的反向持续性强于持续性。将 Hurst 指数进行分级显示并统计得出,弱、较弱持续性系列(0.35~0.65)占 91.9%, 植被的恢复若依靠单一因素(自然或人类活动修复, 例如自然维持的原始森林、人类维持的农田), 其恢复序列表现出较强的持续性, 而黄河流域这种弱持续性证明了植被覆盖变化是在自然、人类活动等多种因素共同驱动下形成的。

从 Hurst 指数空间分布来看(图 4a),Hurst 指数中部高, 东西低, 反向持续序列占主体与持续性序列呈斑块分布, 反持续序列主要分布在上游黄河源区、甘肃中东部、包头—呼和浩特一带、山西西部、黄土高原东部及天水—关中一带等地。为探究未来趋势的

可持续性, 将趋势分析结果与可持续分析 Hurst 指数进行耦合叠加(图 4b), 通过进一步统计(表 4), 54.4% 的区域将由改善变为退化, 4.1% 的区域持续退化, 而持续改善和由退化到改善的区域分别占 37.2% 和 4.3%。黄河源区植被为高寒植被, 未来植被变化较为复杂, 持续改善/退化、反持续改善/退化在黄河源区呈现斑点零散的特征。四川省北部、甘肃省中部、祁连山区、乌海、鄂尔多斯、包头、延安、朔州、三门峡市等地呈反持续改善, 这些地区大部分为高寒植被和温带草原区, 未来植被有可能出现退化趋势。黄土高原地区主要为可持续性, 以持续改善趋势为主体, 未来植被可能会持续改善, 表明退耕还林/草等生态工程建设对该地区未来植被的改善有积极的作用。由于城市化、人口发展、经济结构等因素的影响, 西宁市、兰州市、河套平原、关中平原、中下游城市等地未来可能持续退化, 并伴随着反持续退化现象的发生。

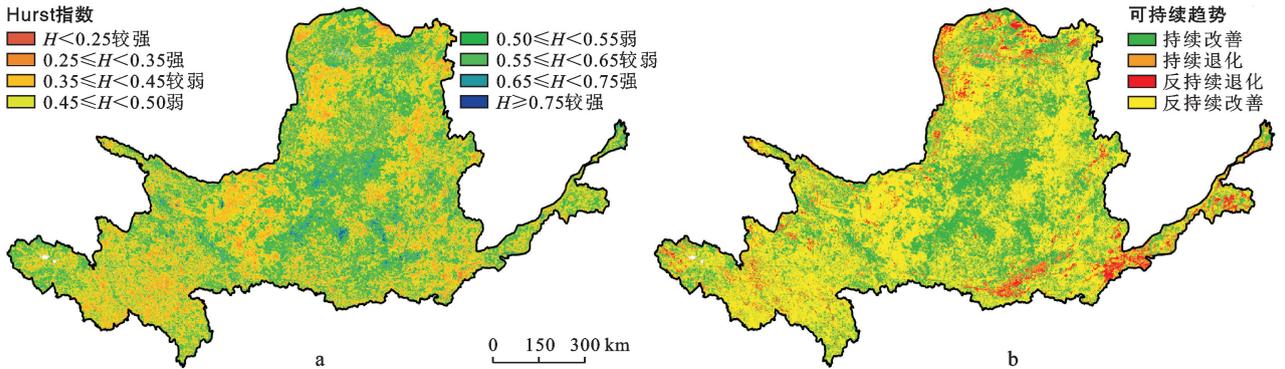


图 4 2000—2018 年黄河流域 NDVI 的 Hurst 指数空间分布及可持续趋势

表 3 2000—2018 年黄河流域 NDVI 的 Hurst 指数统计

Hurst 指数	像元数/个	比例/%
$H < 0.25$ 较强	12 550	0.1
$0.25 \leq H < 0.35$ 强	572 296	4.5
$0.35 \leq H < 0.45$ 较弱	4 062 821	31.8
$0.45 \leq H < 0.50$ 弱	2 992 282	23.4
$0.50 \leq H < 0.55$ 弱	2 431 644	19.0
$0.55 \leq H < 0.65$ 较弱	2 265 907	17.7
$0.65 \leq H < 0.75$ 强	409 942	3.2
$H \geq 0.75$ 较强	39 756	0.3

表 4 2000—2018 年黄河流域 NDVI 的变化趋势持续性

变化趋势 Slope	持续性 Hurst	NDVI 变化	像元数/个	比例/%
$< 0$	$< 0.5$	反持续退化	539 605	4.3
$< 0$	$\geq 0.5$	持续退化	523 538	4.1
$\geq 0$	$< 0.5$	反持续改善	6 962 485	54.4
$\geq 0$	$\geq 0.5$	持续改善	4 756 243	37.2

## 2.2 NDVI 对气候和人类活动的响应

### 2.2.1 NDVI 对气候的响应 黄河流域地处中国干

旱和半干旱地区,降水量的多少直接影响 NDVI 的变化,气温也是影响黄河流域 NDVI 变化的直接原因之一。为探究 NDVI 与降水量和气温的变化关系,分别将 NDVI 与降水量和气温进行相关分析(图 5),发现

NDVI 与降水量具有较显著的正相关性( $r=0.545$ ,  $p<0.05$ ,  $n=19$ ),与气温也存在一定程度的相关性( $r=0.356$ ,  $p<0.05$ ,  $n=19$ ),NDVI 对降水的响应大于气温。

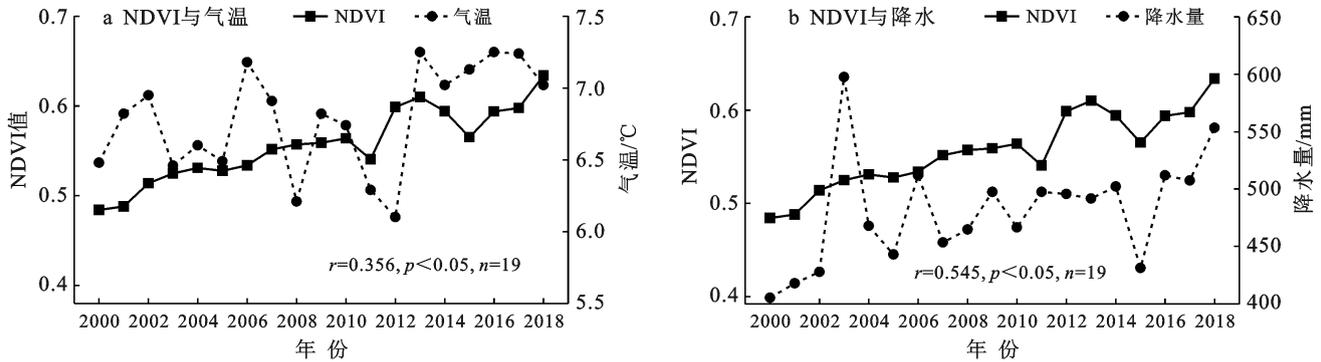


图 5 2000—2018 年黄河流域 NDVI 与气温及降水变化相关分析

同时对研究区 NDVI 与降水、气温分别进一步进行偏相关分析,并进行  $p<0.05$  的显著性检验(图 6), NDVI 与降水和气温的平均偏相关系数分别为 0.6, 0.1, 进一步表明 NDVI 与降水和气温呈正相关,且与降水的偏相关强度稍大于气温,主要是由于黄河流域处于干旱半干旱地带,加之气候变暖,使得干旱的几率增加,制约植被生长。通过显著性检验的偏相关结果显示,整体上 NDVI 与降水呈显著正偏相关,主要分布在青海黄河两岸地区、甘肃中东部、宁夏南部、乌海东部、鄂尔多斯—呼和浩特一带、朔州、毛乌素沙地、延安黄土高原沟壑区—吕梁一带以及三门峡—运城一带等地集中分布,在关中平原、太原盆地、临汾盆地、郑州花园口及山东济南等地呈零散状分布。NDVI 与降水呈显著负相关的区域主要分布在四川北

部、乌海、宝鸡、洛阳及济南等地。

整体上 NDVI 与气温呈显著正相关,上游的三江源区、四川北部及甘肃甘南,位于青藏高原气候带,海拔高,生态环境极为敏感脆弱,低温严重制约植被生长,除此,正相关的区域在平凉—庆阳一带、宁夏平原、包头、临汾盆地、陕西河南交界及开封—濮阳一带等地零散分布。NDVI 与气温呈显著负相关的区域主要在毛乌素沙地、乌海、巴彦淖尔、延安一带的黄土高原沟壑区、吕梁及洛宁—卢氏一带呈块状分布,黄南、临夏、包头—呼和浩特一带、天水—关中原一带、运城盆地、晋城、郑州花园口—小浪底水库以及济南—黄河三角洲一带等地零散分布。其中在黄土高原区,高温对植被以抑制为主,随着温度的升高,地面蒸发增加,土壤干化不利于植被生长。

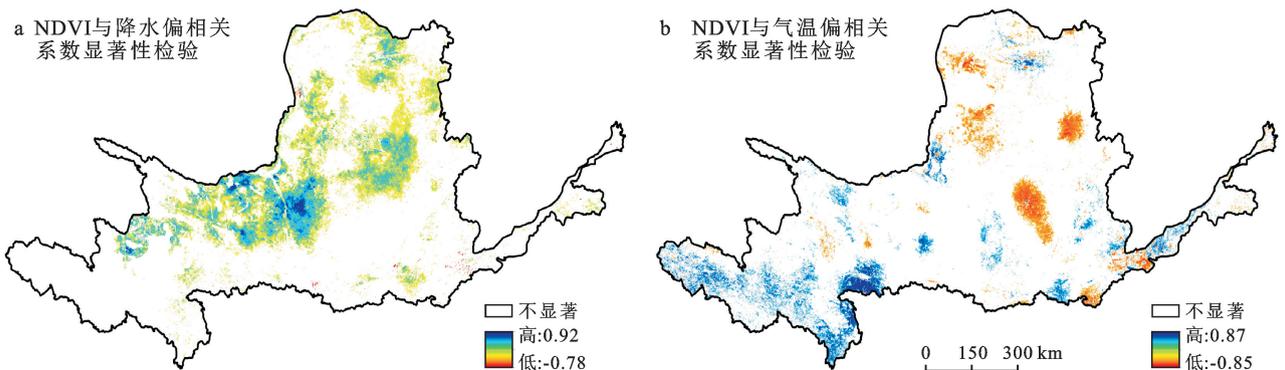


图 6 2000—2018 年黄河流域 NDVI 与降水及气温的偏相关分析

2.2.2 NDVI 对人类活动的响应 除气候变化等自然因素外,人类活动也是影响植被覆盖的重要因素,一般来说,人类活动对植被生长的影响有两方面:

①正干扰,使得生态环境得到改善;②人类活动对植被生长产生负干扰,其会加剧植被退化程度。通过残差分析计算趋势变化特征,残差变化趋势率为正表示

人类活动促进植被 NDVI 增加,对植被恢复具有促进作用;反之,表示会导致植被 NDVI 减少,对植被恢复具有抑制作用。

为了更好地评价人类活动对植被生长状况的影响,将残差趋势进行划分等级并统计(图 7),黄河流域 76.7%的地区 NDVI 残差趋势为正,人类活动整体对 NDVI 增加的影响以促进作用为主,主要分布在中上游的黄河源区、甘肃中部、宁夏沿黄区、河套平原、黄土高原沟壑区、天水东部等,这些地区由于生态工程建设、农业发展、封山育林、禁牧休牧等原因,人类活动对植被产生了促进影响。而人类活动抑制 NDVI

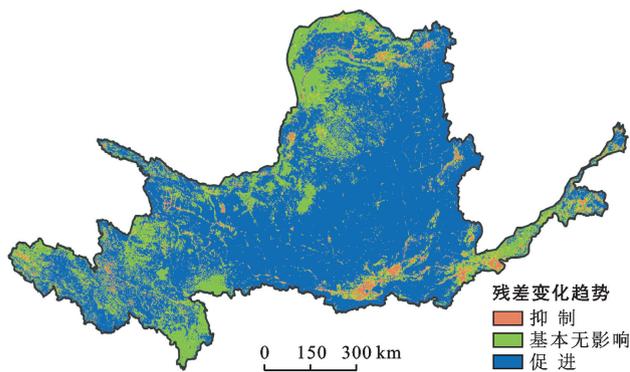
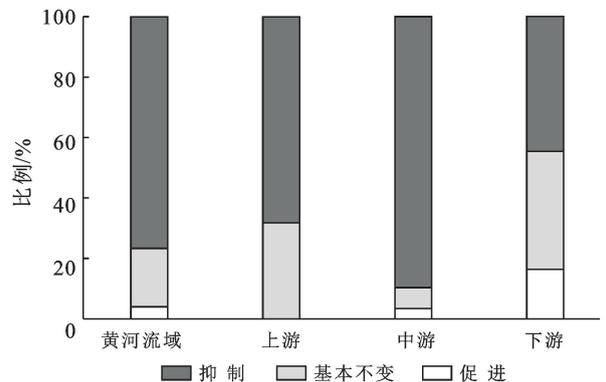


图 7 2000—2018 年黄河流域 NDVI 残差变化趋势分布及统计

国内外现有研究表明,农业生产水平的提高、劳动力转移、经济水平的提高、生活方式的转变都可能影响到植被覆盖的变化<sup>[37-38]</sup>,人类活动存在难以量化研究的问题。结合信忠保<sup>[13]</sup>和赵安周等<sup>[29]</sup>研究,下面从植被建设及农业生产等方面来分析人类活动对植被的影响。中游的黄土高原沟壑中部地区,处于半干旱区,近些年来由于大力实施退耕还林(草)、植树造林、合理放牧等国家或区域性政策的实施措施,对植被生长产生了直接影响,当地植被得到了较好的恢复。延安和榆林是中游地区退耕还林还草典型重点区域,对两个地区自 2000 年来累计造林面积与 NDVI 的关系统计(图 8a 和 8b),发现区域 NDVI 与累计造林面积呈现极显著的正相关,相关系数分别达到 0.95( $n=19, p<0.01$ )和 0.916( $n=19, p<0.01$ )。在上游的宁夏和内蒙古黄河两岸灌溉区等地,深居内陆,干旱少雨,其农业生产对农业灌溉依赖性较强。由于农业灌溉得当,农业发展良好,多数区域的耕地 NDVI 得到增加。通过对宁夏自 2000 年以来的粮食产量与 NDVI 的关系进行分析(图 8c),粮食产量呈波动上升的趋势,NDVI 与之较为同步,二者具有极显著的正相关关系( $r=0.862, n=19, p<0.01$ )。然而在农业生产及植被建设中应考虑大规模造林和农业灌溉对上述地区水资源的影响,避免造成土壤水分

增加的地区仅占 3.9%,大多集中分布在各城市(群),如兰州、银川、吴忠、太原、关中城市群、中原城市群、济南等,其中以中下游地区城市(群)较为集中,这些地区人口密度大,经济较为发达,在不断的城市化进程中,城市建成区扩张,大量耕地变为建设用地,人类活动对植被的生长起到了抑制性作用。根据 NDVI 变化趋势、与降水气温的偏相关分析结果可知,在黄河源区,受人类活动影响较低,主要依赖气候因子控制,随着黄河源区的三江源生态保护工程的逐步建设,未来人类活动可能对该地区的影响会逐步增强。



及地下水减少,反向抑制植被的生长,在不影响原有自然条件的基础上,继续开展植树造林和农业生产活动。除此,通过对比发现人类活动影响下 NDVI 的变化趋势(图 7a)和实际 NDVI 变化趋势(图 3a)在一定程度上存在较强的一致性。以上说明 NDVI 的增长并不完全依赖于自然条件,人类的各项活动黄河流域植被生长中发挥了重要作用。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 结论

本文基于 MODIS NDVI 数据、气温和降水数据,采用一元线性趋势分析、Hurst 指数、偏相关分析及残差分析等方法,分析了 2000—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化格局,并探讨了其对气温、降水等气候因子和人类活动两个方面的响应。

(1) NDVI 时间变化。2000—2018 年黄河流域 NDVI 主要呈现在波动中不断增加的趋势,总体增长率为 6.8%/10 a,分为 3 个阶段。第一阶段(2000—2011 年)增速较缓,第二阶段(2011—2015 年)先增加后减少,第三阶段(2015—2018 年)持续增加。

(2) NDVI 空间分布。黄河流域 NDVI 在东南部及西部较高,北部及西北部较低,由东南向西北减少,下游最高,中游次之,上游最低。整体以东亚季风

生态地理区和西北干旱生态地理区界线(鄂尔多斯—毛乌素沙地—庆阳—平凉—定西)和青藏高原生态地理区和西北干旱生态地理区及东亚季风生态地理区界线(西宁—甘南—定西)为界呈 V 字型分布。

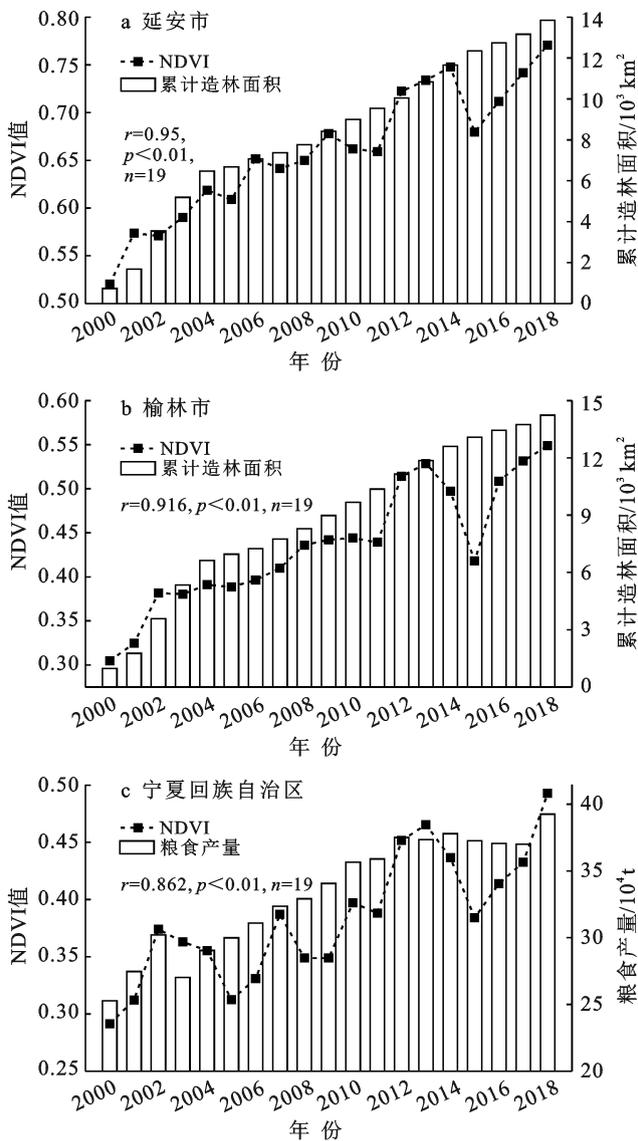


图 8 2000—2018 年 NDVI 与延安、榆林市累计造林面积及宁夏回族自治区粮食产量的相关分析

(3) NDVI 变化趋势。黄河流域植被 NDVI 整体以改善为主,改善区约占 62.32%,主要集中在中上游地区,存在 3 条界线:①鄂尔多斯—毛乌素沙地—庆阳—平凉—定西—西宁—甘南;②太原盆地—临汾盆地—关中平原;③运城盆地—三门峡,两两界线间基本为改善区,而退化区域以中下游为主,呈零散分布;变化反持续性强于持续性,前者占主体,与后者呈斑块分布,且表现出较强的弱持续性,有 54.4% 的区域将由改善变为退化,4.1% 的区域持续退化,而持续改善和由退化到改善的区域分别占 37.2% 和 4.3%。

(4) NDVI 对气候和人类活动响应。NDVI 黄河流域 NDVI 与降水和气温呈正相关,且与降水的偏相关强度稍大于气温。流域 76.7% 的地区的 NDVI 残差呈增长的趋势,说明人类活动整体对 NDVI 增加的影响以促进作用为主,其促进作用:中游>上游>下游。在人类活动中,农业生产及生态工程建设对 NDVI 变化有着重要影响。也存在少部分地区人类活动对 NDVI 增加产生了干扰,主要是由于能源开发、城市化发展、土地利用变化、过度开垦、人口密集、经济发展等因素。

### 3.2 讨论

黄河流域地处干旱、半干旱及半湿润地区,生态环境脆弱,植被变化长期复杂。本文通过研究发现黄河流域植被分布差异较为明显,其变化受到气候和人类活动的综合影响,总体呈现波动上升的趋势,其整体分布为东南高西北低,与前人研究一致<sup>[18-19]</sup>。研究区内包括黄河源区、宁夏平原、甘肃中东部、鄂尔多斯高原、黄土高原沟壑区、关中等地区植被分布及变化特征与有关研究基本吻合<sup>[9,11-12,18,23,29-30,39-41]</sup>。黄河流域植被整体是改善的,其中气温、降水等因子对植被生长有重要影响,且具有空间异质性<sup>[39]</sup>,而人类活动在植被生长中也扮演了重要的角色,会对 NDVI 变化产生正面促进或负面干扰的影响。通过分析得出,农业生产与植树造林等活动对植被恢复具有促进作用<sup>[13,29]</sup>,也有研究发现,大力建设国家公园与自然保护区,制定合理放牧、保护耕地等政策法规,以及实施天保、退耕还林(草)、水土保持等生态工程,均会对当地的植被生长 NDVI 增加产生促进作用<sup>[11,21-22,28-29,41]</sup>。不同地区的 NDVI 的主导因子也可能不同,例如在黄土高原地区降水因素对 NDVI 的影响较强于温度,气候因素是三江源区 NDVI 变化的主要驱动力,其中气温升高主要促进 NDVI 增加,目前人类活动对该地区 NDVI 的促进作用仍有限,随着生态工程的实施,人类影响可能会进一步增加,这与已有研究具有一定的一致性<sup>[13,15,17,22,24-25]</sup>。

退耕还林 20 a 以来,中国累计实施退耕还林还草  $3.39 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占中国重点工程造林总面积的 40%,成林面积近  $2.67 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,林草植被大幅增加,风沙危害和水土流失得到有效遏制,生态状况显著改善。然而在生态工程建设中应充分考虑当地的气候水文等因素,因地制宜、分区分类开展,以黄土高原为代表的干旱—半干旱区,若过度开展植树造林,忽略对土壤水分蒸散发的影响,会造成区域水资源减少,加剧干旱—半干旱地区水资源压力,反而不利于植被恢复<sup>[13,29]</sup>。在上游地区,国家已经成立三江源自

然保护区,并于2005年颁布《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》,采取了牧区产业结构调整、转变经济发展方式、牧民进城以及禁牧补贴等一系列有效措施,三江源区生态环境得到进一步恢复<sup>[28,40]</sup>,鄂尔多斯等地2000年以来推行了一系列政策,如封山育林、退耕还林、禁牧、休牧、划区轮牧,推动了草原生态自然恢复<sup>[12]</sup>,人类的保护与治理在区域植被恢复中正逐步起到促进作用。经济发展和城市建设不可避免地对植被造成影响,导致区域生态环境恶化,中下游城市(群)人口密度大,城市扩张迅速,应同时注重城市建设和生态建设,河南省近年在沿黄河两岸已造林46.67 km<sup>2</sup>,打造沿黄生态廊道120 km,极大地改善了生态环境。人类活动日益在植被恢复中起到不可忽视的作用,开展适度的生态工程如植树造林,建设自然保护区,发展农业生产及实施相关政策如禁牧休牧等均对植被恢复生态改善具有重要影响。

本文仅采用降水和气温作为NDVI变化的气候驱动因子进行分析,日照时长、风速、蒸散发等也可能对植被产生影响;在利用残差分析来探讨人类活动对NDVI增加产生的影响时,未将气候因子及人类活动的贡献进行定量分析;另外在时间尺度方面,由于不同季节月份的气候差异,植被对气候可能会存在一定的滞后现象,本文从年际尺度分析,未将季节尺度和月尺度上的植被生长对气候滞后性的响应纳入研究。总之,从开展多尺度分析、细化人类活动因子、量化气候和人类因素对NDVI变化中的相对贡献等方面对黄河流域NDVI时空变化特征及其驱动机制研究有待今后进一步的探讨。

#### [参 考 文 献]

- [1] Piao Shilong, Fang Jingyun, Liu Hongyan, et al. NDVI-indicated decline in desertification in China in the past two decades [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(6): 347-354.
- [2] 徐冠华,葛全胜,宫鹏,等.全球变化和人类可持续发展:挑战与对策[J].*科学通报*, 2013, 58(21): 2100-2106.
- [3] 孙红雨,王长耀,牛铮.中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系:基于NOAA时间序列数据分析[J].*遥感学报*, 1998, 2(3): 204-210.
- [4] 邓晨晖,白红英,高山,等.秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J].*自然资源学报*, 2018, 33(3): 425-438.
- [5] 谢慧君,张廷斌,易桂花,等.川西高原植被NDVI动态变化特征及对气候因子的响应[J].*水土保持通报*, 2020, 40(4): 286-294, 328.
- [6] 孟丹,李小娟,宫辉力,等.京津冀地区NDVI变化及气候因子驱动分析[J].*地球信息科学学报*, 2015, 17(8): 1001-1007.
- [7] 陈效速,王恒.1982—2003年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J].*地理学报*, 2009, 64(1): 84-94.
- [8] 伍良旭,王晗,邵怀勇,等.川西高原植被时空格局及其对气候变化的响应[J].*水土保持研究*, 2021, 28(1): 171-178.
- [9] 陆荫,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.
- [10] 同英杰,文彦君,张翀.2003—2017年陕西省NDVI时空变化及其影响因素[J].*水土保持通报*, 2020, 40(3): 155-162, 169.
- [11] 李晓光,刘华民,王立新,等.鄂尔多斯高原植被覆盖变化及其与气候和人类活动的关系[J].*中国农业气象*, 2014, 35(4): 470-476.
- [12] 易浪,任志远,张翀,等.黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J].*资源科学*, 2014, 36(1): 166-174.
- [13] 信忠保,许炯心,郑伟.气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J].*中国科学(D辑:地球科学)*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [14] Xu Lili, Yu Guangming, Tu Zhenfa, et al. Monitoring vegetation change and their potential drivers in Yangtze River basin of China from 1982 to 2015 [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(10): 1-18.
- [15] 李辉霞,刘国华,傅伯杰.基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J].*生态学报*, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [16] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J].*地理学报*, 2020, 75(5): 961-974.
- [17] 刘绿柳,许红梅.黄河流域主要植被类型NDVI变化规律及其与气象因子的关系[J].*中国农业气象*, 2007, 28(3): 334-337.
- [18] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].*生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [19] 颜明,贺莉,王随继,等.基于NDVI的1982—2012年黄河流域多时间尺度植被覆盖变化[J].*中国水土保持科学*, 2018, 16(3): 86-94.
- [20] 张亚玲,苏惠敏,张小勇.1998—2012年黄河流域植被覆盖变化时空分析[J].*中国沙漠*, 2014, 34(2): 597-602.
- [21] 孙庆龄,李宝林,许丽丽,等.2000—2013年三江源植被NDVI变化趋势及影响因素分析[J].*地球信息科学学报*, 2016, 18(12): 1707-1716.
- [22] 徐兴奎,陈红,Levy J K.气候变暖背景下青藏高原植被覆盖特征的时空变化及其成因分析[J].*科学通报*, 2008, 53(4): 456-462.
- [23] 吴加敏,蔡创创,孙灏,等.宁夏沿黄城市带植被覆盖时空演变及其驱动力分析[J].*干旱区研究*, 2020, 37(3): 696-705.

- [24] 贺振,贺俊平.近 32 年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测[J].农业机械学报,2017,48(2):179-185.
- [25] 孙睿,刘昌明,朱启疆.黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系[J].地理学报,2001,56(6):667-672.
- [26] 杨胜天,刘昌明,孙睿.近 20 年来黄河流域植被覆盖变化分析[J].地理学报,2002,57(6):679-684.
- [27] 李春晖,杨志峰.黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系[J].地理研究,2004,23(6):753-759.
- [28] 刘宪锋,任志远,林志慧,等.2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J].地理学报,2013,68(7):897-908.
- [29] 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.
- [30] 李双双,延军平,万佳.近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J].地理学报,2012,67(7):960-970.
- [31] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003,24(5): 1111-1117.
- [32] Wang Fang, Ge Quansheng, Wang Shaowu, et al. A new estimation of urbanization's contribution to the warming trend in China [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(22):8923-8938.
- [33] Yin Lichang, Feng Xiaoming, Fu Bojie, et al. Irrigation water consumption of irrigated cropland and its dominant factor in China from 1982 to 2015 [J]. *Advances in Water Resources*, 2020,143:103661.
- [34] Yin Lichang, Wang Xiaofeng, Feng Xiaoming, et al. A comparison of SSEBop-model-based evapotranspiration with eight evapotranspiration products in the Yellow River basin, China [J]. *Remote Sensing*, 2020,12(16):2528.
- [35] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].3 版.北京:高等教育出版社,2017:37-41.
- [36] Geerken R, Ilaivi M. Assessment of rangeland degradation and development of a strategy for rehabilitation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004,90(4):490-504.
- [37] Ostwald M Chen Deliang. Land-use change: Impacts of climate variations and policies among small-scale farmers in the Loess Plateau, China [J]. *Land Use Policy*, 2006,23(4):361-371.
- [38] 许炯心.农村社会经济因素变化对嘉陵江产沙量的影响[J].山地学报,2006,24(4):385-394.
- [39] 高江波,焦珂伟,吴绍洪.1982—2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析[J].地理学报,2019,74(3):534-543.
- [40] 白子怡,薛亮,薛东前,等.关中—天水经济区人类活动对植被覆盖变化的影响[J].中国农业大学学报,2020, 25(2):151-159.
- [41] 刘启兴,董国涛,景海涛,等.2000—2016 年黄河源区植被 NDVI 变化趋势及影响因素[J].水土保持研究, 2019,26(3):86-92.

(上接第 275 页)

- [15] 王航,秦奋,朱筠,等.土地利用及景观格局演变对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2017,37(4):1286-1296.
- [16] 杨雪婷,邱孝梓,徐云,等.典型山区生态系统服务对居民福祉影响的空间差异及其动态特征研究:以川西山区为例[J].生态学报,2021,41(19). DOI: 10.5846/stxb202005261347.
- [17] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(5):19-25.
- [18] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [19] 陈婧祎,罗红霞,胡林利,等.生态系统服务价值与社会经济相关性研究:以重庆市大都市区为例[J].水土保持研究,2017,24(4):330-336.
- [20] 马琳,刘浩,彭建,等.生态系统服务供给和需求研究进展[J].地理学报,2017,72(7):1277-1289.
- [21] 曹君,张正栋,陈宋佳,等.1996—2015 年粤港澳大湾区生态系统服务对景观格局变化的响应[J].华南师范大学学报(自然科学版),2020,52(5):93-105.
- [22] 陈明叶,刘素红,于连海,等.大清河阜平流域生态系统结构变化的服务价值响应研究[J].自然资源学报, 2018,33(8):1376-1389.
- [23] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [24] 董光,何兰,王艺积,等.1990—2017 年河北省易县土地利用时空格局动态变化[J].中国农业资源与区划, 2020,41(1):242-249.
- [25] Wang Jieyong, Liu Yansui, Liu Zhigao. Spatio-temporal patterns of cropland conversion in response to the “grain for green project” in China's loess hilly region of Yanchuan County [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(11):5642-5661.
- [26] 王雅敬,谢炳庚,苏维词,等.贵州省玉屏县土地利用格局时空变化对生态服务价值的影响[J].水土保持研究,2016,23(3):180-184.
- [27] 师满江,颀耀文,曹琦.干旱区绿洲农村居民点景观格局演变及机制分析[J].地理研究,2016,35(4):692-702.
- [28] 张文彤.SPSS 统计分析高级教程[M].北京:高等教育出版社,2004.