

尹振良,冯起,王凌阁,等.2000—2019年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子[J].中国沙漠,2022,42(4):11–21.

2000—2019年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子

尹振良¹,冯起¹,王凌阁²,陈泽霞²,常亚斌²,朱睿²

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室,甘肃 兰州 730000; 2.兰州交通大学 测绘与地理信息学院/地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心/甘肃省地理国情监测工程实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要:中国西北地区土地荒漠化问题严重,生态环境脆弱。厘清该地区植被覆盖时空变化特征及影响因子,对生态环境保护具有重要意义。基于MOD13A3数据,通过最大值合成法处理获得2000—2019年归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)时序数据,采用趋势分析、Hurst指数法及地理探测器对研究区植被覆盖的时空变化特征及影响因子进行分析。结果表明:(1)2000—2019年,研究区植被覆盖整体呈增长趋势,*NDVI*年增长速率为0.0027($P<0.05$),均值为0.252。空间分区年增长速率有差异,黄河流域片区(0.0062)>半干旱草原片区(0.0026)>内陆干旱片区(0.0018)。(2)研究区植被覆盖呈增长趋势的面积占55.77%,退化区域占3.76%,增长的土地利用类型以耕、林、草地为主。植被覆盖变化趋势具有持续性的区域面积占总面积的31.87%,其中持续性改善面积(17.04%)大于持续性退化面积(1.27%),黄河流域片区增长情况及持续性增长情况最优。(3)影响植被覆盖空间分布的主要因子按影响力依次为降水、气温、日照、相对湿度,但对各分区的影响程度略有差异。黄河流域片区、内陆干旱片区空间分布受降水影响最大,半干旱草原区受日照影响最大。(4)研究区植被覆盖变化以自然因子与人类活动共同驱动为主,自然因子对植被生长的促进作用大于人类活动,且自然因子对植被覆盖变化的贡献率更高。本研究结果可为评估气候变化背景下西北地区生态环境变化提供参考。

关键词:西北地区; *NDVI*; 植被覆盖变化; 影响因子; 地理探测器; Hurst指数

文章编号: 1000-694X(2022)04-011-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00200

中图分类号: X826

文献标志码: A

0 引言

植被是陆地生态系统的重要组成部分,植被覆盖度可以反映某一地区植被生长状况,也是生态系统研究的热点^[1-2]。归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)是研究植被覆盖度与生长状况的遥感因子,其变化趋势可以反映植被覆盖的变化程度,近年来也被用于监测荒漠化变化,是评价生态环境状况及演化变迁的重要指标^[3]。

近20年,国内外学者利用*NDVI*长时间序列数据,采用趋势分析法、Mann-Kendall非参数检验、Hurst指数、相关分析、偏相关分析、残差分析等对植

被覆盖变化及影响因素进行了探究。部分学者也采用全局莫兰指数 I 、Getis-Ord指数、地理探测器等对植被覆盖的空间分布情况及集聚情况进行分析。Ibrahim等^[4]使用一元线性回归、残差分析、Mann-Kendall非参数检验分析了1982—2012年撒哈拉以南非洲地区土地退化的影响因素,认为相比降水而言,土壤湿度与该地区*NDVI*变化的相关性更高。马明国等^[5]利用1981—2001年中国西北地区的AVHRR数据,采用均值法、差值法和一元线性回归模拟法,分析了西北地区植被变化特征,认为研究期内植被覆盖存在退化趋势,改善趋势小于退化趋势。袁丽华等^[6]使用Theil-Sen Median趋势分析、

收稿日期:2021-08-17; 改回日期:2021-11-21

资助项目:中国科学院青年创新促进会项目;中国工程院咨询研究项目(2020-XZ-15);甘肃省重点研发计划项目(20YF8FA002);新疆生产建设兵团重点领域科技攻关计划项目(2021AB021)

作者简介:尹振良(1985—),男,山东安丘人,副研究员,主要从事水文过程模拟研究。E-mail: yinzenliang@lzb.ac.cn

Mann-Kendall 非参数检验及 Hurst 指数, 分析了 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化趋势特征及变化趋势的可持续性。肖建勇等^[7]采用趋势分析、Hurst 指数、相关分析、地理探测器等, 分析了中国南方喀斯特关键带植被覆盖时空变化特征及影响因素。Hammadi 等^[8]利用全局莫兰指数 I 、Getis-Ord 指数对突尼斯北部的森林覆盖变化进行了分析, 并判断了森林覆盖减小的区域。

中国西北地区生态环境脆弱, 土地荒漠化问题严重。新疆、甘肃、阿拉善高原地区是中国境内沙尘暴的主要起源地, 陕西、甘肃、宁夏地区的黄土高原水土流失严重^[9], 严重影响了当地的生态文明建设。研究该地区的生态环境演变与发展趋势, 并对未来发展趋势进行预测, 对该地区生态环境保护具有重要

意义。本文基于 2000—2019 年的 MODIS-NDVI 遥感数据, 对研究区植被覆盖时空变化特征、空间分布与变化趋势、未来演化趋势进行了分析, 旨在揭示研究区植被覆盖变化的自然与人类活动影响因子, 对改善当地脆弱生境及制定保护政策提供有效依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

中国西北地区地理位置 73.41°E — 120°E , 32.65°N — 49.16°N , 行政范围包含新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西五省和内蒙古自治区部分区域, 该区涵盖 3 个自然环境分区——内陆干旱片区、黄河流域片区、半干旱草原片区, 面积 345 万 km^2 (图 1)。

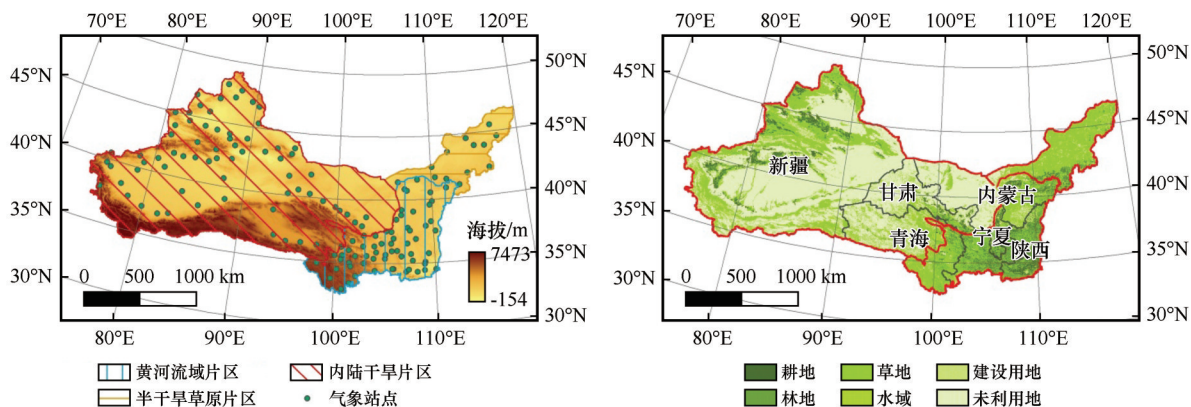


图1 研究区概况及土地利用分类

Fig.1 Study area and land use types

黄河流域片区是半干旱和半湿润的黄河流域, 总面积约 63 万 km^2 , 以黄土高原为主, 区内沟壑丛生, 植被覆盖状况较好, 土地利用以耕地、林地、灌木、草地为主^[6]。

内陆干旱片区是贺兰山以西的干旱区及极干旱区, 总面积约 253 万 km^2 , 包括塔里木盆地、柴达木盆地、青海湖盆地、阿拉善高原等。区内大面积植被覆盖不佳, 分布着大量的戈壁、沙漠、裸地等无植被区域, 耕地主要分布在绿洲区域^[10]。

干旱草原片区是贺兰山以东的半干旱区, 总面积约 29 万 km^2 , 区内植被覆盖以草地为主, 属于干旱、半干旱气候向湿润、半湿润季风气候的过渡地带^[11]。

1.2 数据来源及预处理

NDVI 数据使用美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 中分

分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 提供的植被指数产品数据 MOD13A3 (<https://earthdata.nasa.gov>), 作为月度最大值合成、1 km 空间分辨率数据。使用 MRT (MODIS Reprojection Tools) 批量拼接投影后采用最大值合成法将月尺度 NDVI 合成为 2000—2019 年 NDVI 数据集, 采用平均值法处理得到 20 年平均 NDVI 数据。研究区气象数据来源于中国气象数据网月值数据, 使用协同克里金插值得到 2000—2019 年的年平均气温、年降水量、年日照时间、年均相对湿度以及 20 年平均降水量、平均气温、平均日照时间、平均相对湿度。土地利用数据、DEM 数据、矢量数据等来源于资源环境数据云平台 (<https://www.resdc.cn>), 其中土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地。

1.3 研究方法

1.3.1 时间序列分析方法

1.3.1.1 趋势分析法

对每个栅格的多年NDVI值做一元线性回归分析,回归分析的斜率可以表示研究时期内NDVI的空间变化趋势^[12]:

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

式中:Slope为栅格NDVI回归方程的斜率; n 为年跨度,本文为20; i 为1—20的年序号; NDVI_i 为第 i 年的NDVI值;当Slope>0时,表明植被覆盖呈增长趋势;当Slope=0时,表明植被覆盖无变化;当Slope<0时,表明植被覆盖呈退化趋势;本文采用宋怡等^[10]的Slope值分级,分别为:严重退化($\text{Slope} \leq -0.0091$)、中度退化($-0.0091 < \text{Slope} \leq -0.0046$)、轻微退化($-0.0046 < \text{Slope} \leq -0.0010$)、基本不变($-0.0010 < \text{Slope} \leq 0.0010$)、轻微增长($0.0010 < \text{Slope} \leq 0.0045$)、中度增长($0.0045 < \text{Slope} \leq 0.0090$)、明显增长($\text{Slope} > 0.0090$)。

1.3.1.2 累积距平分析

累积距平分析^[13]是一种直观表示变化趋势的方法,通过计算研究时期内研究区域 i 年的NDVI均值与多年平均NDVI值的差距,可以判断出研究时期内NDVI随时间变化的趋势。

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中: \hat{x}_t 为第 t 年的累积距平; x_i 为 i 年的NDVI平均值; \bar{x} 为研究时段的NDVI平均值; n 为研究时长。

1.3.1.3 Hurst指数

Hurst指数是定量描述时间序列自相似性和长期依赖性的有效方法^[14],近年来也被广泛用于植被覆盖变化研究。其估算方法以重极差(Rescaled Range, R/S)分析法更为可靠,本文采用 R/S 分析法进行估算。

对于时间序列 $\text{NDVI}_i, i=1, 2, 3, 4, \dots, n$,对于任意正整数 $t \geq 1$,定义该时间序列均值序列:

$$\overline{\text{NDVI}}(t) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \text{NDVI}_i \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

累积离差

$$X(m) = \sum_{i=1}^m (\Delta \text{NDVI}_i - \Delta \overline{\text{NDVI}}(t)) \quad (1 \leq m \leq t) \quad (4)$$

极差

$$R(t) = \max_{1 \leq m \leq n} X(m) - \min_{1 \leq m \leq n} X(m) \quad (t = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

标准差

$$S(t) = \left[\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (\Delta \text{NDVI}_i - \Delta \overline{\text{NDVI}}(t))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (t = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

对比 $R(t)/S(t) \approx R/S$,若存在 $R/S \propto t^H$,则表明分析的时间序列存在Hurst现象, H 称为Hurst指数,可以反映时间序列的随机性或持续性特征。当 $0.5 < H < 1$ 时,表明时间序列具有持续性^[15]。

1.3.2 自然与人类活动影响因子分析方法

1.3.2.1 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等^[16]提出的探测空间分异性,以及揭示其背后影响力的一组统计学方法^[17]。可以用于探测各驱动因子 X 对探测因变量 Y 的空间分异性的解释力度:

$$q_{X,Y} = 1 - \frac{1}{N\delta^2} \sum_{i=1}^m X_i \delta_i^2 \quad (7)$$

式中: $q_{X,Y}$ 为影响因素探测力指标; X_i 为次一级区域样本数; N 为整个区域样本数; m 为次级区域个数; δ^2 为研究区所有样本值的方差; δ_i^2 为次一级区域内样本的方差。 $q_{X,Y}$ 的取值范围为 $[0, 1]$, $q_{X,Y}$ 值越大, X 的影响力越大。本文基于地理探测器对植被覆盖空间分布影响因子进行探测分析,选取年均日照、年均相对湿度、年均降水量、年均气温、海拔、坡度、坡向、距离水域的距离等8个自然因子进行空间探测。

1.3.2.2 相关分析

相关系数^[7]可以反映两个变量间的相关关系,通过相关系数来反映各影响因子与NDVI的相关性:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中: n 为样本数;变量 x_i 表示相关因子;变量 y_i 表示NDVI; \bar{x}, \bar{y} 分别为 x_i, y_i 变量的均值; r_{xy} 为变量 x_i 和变量 y_i 的相关系数。本文选择降水、气温、日照、相对湿度为相关因子。

1.3.2.3 残差分析

通过对每个栅格的NDVI与年降水量、年均温度、年日照时间、年均相对湿度做回归分析,得出每个栅格的NDVI预测值,预估出的NDVI预测值可视

为自然因子对 $NDVI$ 的影响,利用实际的遥感观测值减去预测值求得的残差,可视为人类活动对 $NDVI$ 的影响。本文采用金凯等^[18]的驱动因素判定标准及贡献率计算,定量分析人类活动与自然因子的影响及相对贡献:

$$NDVI_{NA} = a \times P + b \times T + c \times S + d \times H + e \quad (9)$$

$$NDVI_{HA} = NDVI_{\text{实际值}} - NDVI_{NA} \quad (10)$$

式中: $a、b、c、d、e$ 为模型参数; $P、T、S、H$ 分别为年降水量、年均温度、年日照时间、年均相对湿度; $NDVI_{NA}$ 与 $NDVI_{HA}$,分别表示自然因子与人类活动影响下的 $NDVI$ 值, $NDVI_{\text{实际值}}$ 为基于遥感影像的观测值。

为了进一步揭示人类活动及自然因子对研究区植被覆盖变化的影响,采用表 1 对驱动因素进行判定及贡献率计算。

表 1 驱动因素判定及贡献率计算方法

Table 1 The determination criterion of driving factors and calculation method of contribution rate

Slope(实际值)	驱动因素	驱动因素的划分标准		驱动因素的贡献率	
		$Slope(NDVI_{NA})$	$Slope(NDVI_{HA})$	自然因子	人类活动
>0	HA & NA	>0	>0	$\frac{Slope(NDVI_{NA})}{Slope(实际值)}$	$\frac{Slope(NDVI_{HA})}{Slope(实际值)}$
	NA	>0	<0	100	0
	HA	<0	>0	0	100
<0	HA & NA	<0	<0	$\frac{Slope(NDVI_{NA})}{Slope(实际值)}$	$\frac{Slope(NDVI_{HA})}{Slope(实际值)}$
	NA	<0	>0	100	0
	HA	>0	<0	0	100

HA 为人类活动,NA 为自然因子; $Slope(NDVI_{NA})$ 为自然因子影响趋势, $Slope(NDVI_{HA})$ 为人类活动影响趋势, $Slope(实际值)$ 为实际的 $NDVI$ 变化趋势。

1.3.3 研究步骤

首先,利用 MRT 工具对 MOD13A3 产品数据进行拼接和投影变换,以研究区范围批量裁剪后,基于最大值合成法将每年 12 期数据合成逐年 $NDVI$ 影像,将小于 0 的异常值赋值为 0,进行均值处理得到 20 年平均 $NDVI$ 分布影像。气象数据采用协同克里金法进行插值处理。其次,使用累积距平分析、趋势分析、Hurst 指数对研究区植被覆盖变化和持续性情况进行分析。以研究区 20 年 $NDVI$ 均值的空间分布为研究对象,利用地理探测器探测 $NDVI$ 空间分布影响因素。最后,通过相关分析法分析气温、降水、日照、湿度与 $NDVI$ 的相关系数,判断上述因子对植被覆盖变化的影响。再使用残差分析法,判断人类活动对研究区植被覆盖变化的影响。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖时空变化特征

多年平均 $NDVI$ 分布可以反映研究区多年平均植被覆盖的空间分布情况。2000—2019 年研究区多年平均植被覆盖分布呈现一定的区域分异性,整

体植被覆盖呈现为东高西低、南高北低趋势(图 2)。由土地利用类型(图 1)及各分区土地利用类型与 $NDVI$ 统计值(表 2)看,黄河流域片区以耕地、林地、草地为主,半干旱草原片区以草地为主,内陆干旱片区以未利用地、草地为主。耕地、林地、草地的主要分布区域与高植被覆盖区域范围类似,未利用地与低植被覆盖区域范围类似。

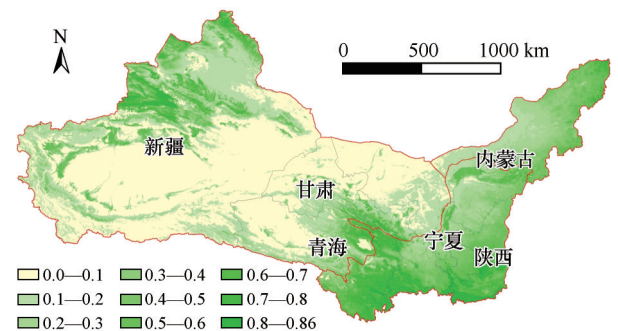


图 2 2000—2019 年平均 $NDVI$ 空间分布

Fig.2 Spatial distribution of mean $NDVI$ during 2000–2019

研究区总体的植被覆盖在 2000—2019 年呈增长趋势, $NDVI$ 年增长速率为 0.0027,均值为 0.252(图 3)。半干旱草原片区 $NDVI$ 年序列值变化较大,其次为黄河流域片区,内陆干旱片区 $NDVI$ 年序列

表 2 各分区不同土地利用类型 *NDVI* 统计结果

Table 2 Statistical results of *NDVI* values of different land cover types in each subregion

	土地利用 类型	<i>NDVI</i> 均值	面积占比 /%	<i>NDVI</i> 分级				
				<0.2	0.2—0.4	0.4—0.6	0.6—0.8	>0.8
黄河流域片区	耕地	0.5197	21.56	0.98	19.63	48.86	28.95	1.57
	林地	0.7092	11.35	0.64	6.92	15.33	40.38	36.73
	草地	0.4959	53.45	6.13	32.25	26.16	27.92	7.54
	水域	0.3779	1.68	23.72	29.89	28.91	16.36	1.13
	建设用地	0.4575	2.78	6.17	32.23	39.36	21.94	0.30
	未利用地	0.2974	9.19	37.40	40.46	11.55	9.00	1.60
半干旱草原片区	耕地	0.4747	7.11	0.14	24.90	62.69	12.27	0.01
	林地	0.6020	1.54	1.82	11.42	29.39	49.21	8.16
	草地	0.3460	76.29	18.89	45.11	30.91	4.94	0.15
	水域	0.2908	1.05	37.46	36.92	22.75	2.84	0.03
	建设用地	0.4080	1.22	6.30	38.17	50.08	5.45	0.00
	未利用地	0.2604	12.78	49.46	29.55	15.37	5.54	0.09
内陆干旱片区	耕地	0.5106	4.49	4.48	19.69	43.53	30.89	1.42
	林地	0.4812	1.74	19.00	18.85	20.00	37.95	4.19
	草地	0.2731	27.69	50.09	26.07	13.18	9.06	1.60
	水域	0.1081	2.07	83.90	9.08	4.58	2.34	0.10
	建设用地	0.3638	0.47	31.07	22.62	28.73	17.17	0.42
	未利用地	0.0974	63.55	93.95	4.45	1.20	0.40	0.01

水域包括滩涂、滩地等有植被覆盖区域,故 *NDVI* 值大于 0。

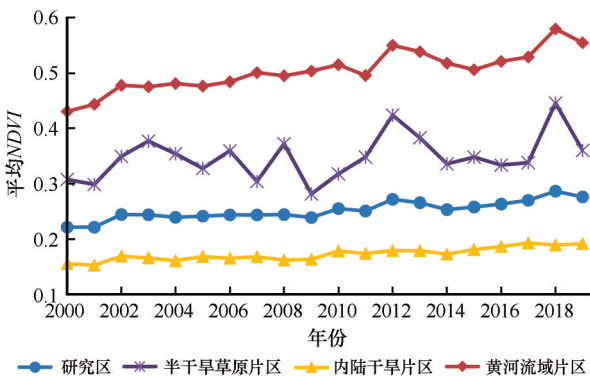


图 3 *NDVI* 年际变化趋势

Fig.3 Annual variation trend of *NDVI*

值变化较小,3 个分区的年序列 *NDVI* 平均偏差分别为 0.0290(半干旱草原片区)、0.0279(黄河流域片区)和 0.0096(内陆干旱片区),研究区整体年序列 *NDVI* 平均偏差为 0.0135。

各分区中,黄河流域片区植被覆盖最高,*NDVI* 均值为 0.504;半干旱草原片区次之,*NDVI* 均值为 0.348;内陆干旱片区的平均植被覆盖最低,*NDVI* 均

值为 0.173。其中,黄河流域片区、内陆干旱片区植被变化趋势与整个研究区变化趋势相似,但增长速率不同,前者年增长速率为 0.0055,后者为 0.0018。半干旱草原片区变化趋势剧烈波动,2000—2001、2008—2010、2013—2017 年呈退化趋势,2001—2007 年为波动期,2011—2013、2017—2019 年呈改善趋势,总趋势呈改善趋势。

2.2 植被覆盖变化趋势特征

增长趋势面积占比大于退化趋势面积(图 4,表 3),表明研究区 2000—2019 年整体植被覆盖度变化趋势呈增长趋势。其中,明显增长区域(7.5%)主要分布在黄河流域片区、甘肃东南部、陕西北部、宁夏南部及新疆天山山脉、塔里木盆地边缘区域,土地利用类型以耕地、草地为主;中度增长区域(11.79%)主要分布在黄河流域片区,处于明显增长趋势区域周围,土地利用类型以草地、耕地为主;轻微增长区域(36.48%)除各大沙漠腹地,均匀分布于各子分区

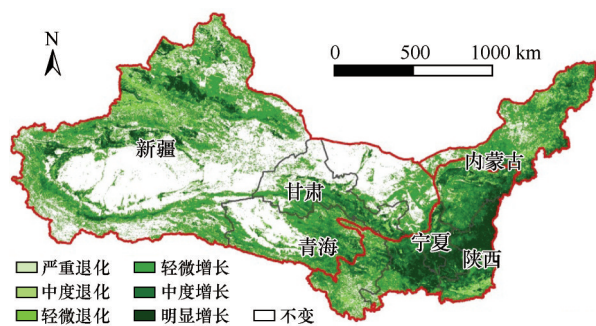


图4 2000—2019年NDVI变化趋势空间分布

Fig. 4 NDVI variation trend during 2000–2019

中,土地利用类型以草地、未利用地为主;不变的区

域(40.46%)主要分布在内陆干旱片区腹部各大沙漠(塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、库姆塔格沙漠、柴达木沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠境内);轻微退化区域(3.11%)主要分布在内陆干旱片区新疆天山以北及半干旱草原片区内蒙古东北区域,土地利用类型以草地为主。中度退化(0.49%)和严重退化区域(0.16%)集中分布在城市建设用地,零星分布于各片区。各分区中,黄河流域片区增长趋势最佳,半干旱草原片区次之,土地利用类型以耕地、草地、林地的增长趋势最佳。

表3 Slope趋势统计结果

Table 3 The statistics results for Slope trend

等级	黄河流域片区		半干旱草原片区		内陆干旱片区		总体	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
11	2 446	0.38	236	0.08	2 545	0.11	5 227	0.16
12	5 064	0.80	1 199	0.40	10 242	0.43	16 505	0.49
13	19 806	3.11	16 212	5.40	67 968	2.82	103 986	3.11
14	62 099	9.75	64 994	21.64	1 225 958	50.93	1 353 051	40.46
15	220 899	34.69	152 987	50.94	846 164	35.16	1 220 050	36.48
16	173 282	27.21	54 022	17.99	167 009	6.94	394 313	11.79
17	153 234	24.06	10 655	3.55	87 044	3.62	250 933	7.50

11.严重退化;12.中度退化;13.轻度退化;14.基本不变;15.轻微增长;16.中度增长;17.明显增长。

Hurst指数可以反映研究区变化趋势的持续性,将Hurst指数空间分布与NDVI变化趋势叠加后得到NDVI变化趋势的持续性分布(图5),共分为7种情况(表4)。

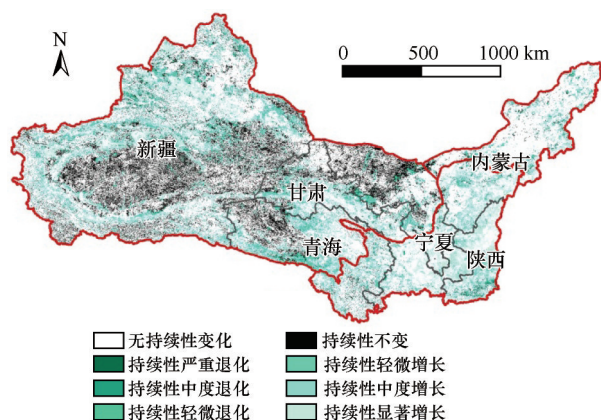


图5 NDVI变化趋势持续性的空间分布

Fig.5 Distribution for the persistence of NDVI variation trend

研究区68.13%的区域变化趋势不具有持续性。持续性不变(13.56%)>持续性轻微增长(10.50%)>

持续性中度增长(3.46%)>持续性显著增长(3.08%)>持续性轻微退化(0.96%)>持续性中度退化(0.22%)>持续性严重退化(0.09%)。各分区中,黄河流域片区以持续性增长为主,半干旱草原片区以持续性轻微增长为主,内陆干旱片区以持续性不变和持续性轻微增长为主。在具有持续性变化的区域中以持续性增长区域(17.04%)占优,表明研究区生态环境会进一步得到改善。

2.3 植被覆盖空间分布影响因子

2.3.1 自然因子

基于地理探测器对植被覆盖空间分布影响因子进行探测分析,选取年均日照、年均相对湿度、年均降水量、年均气温、海拔、坡度、坡向、距离水域的距离等8个自然因子进行空间探测(表5)。

研究区植被覆盖分布受年均降水影响最大,其后依次为年均相对湿度、年均日照、距离水域的距离、年均气温,海拔、坡度、坡向影响力不明显。各

表 4 基于趋势性与持续性的分区统计结果

Table 4 Regional statistical results based on trend and persistence

等级	黄河流域片区		半干旱草原片区		内陆干旱片区		总体	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
11	1 569	0.25	102	0.03	1 386	0.06	3 057	0.09
12	2 612	0.41	290	0.10	4 438	0.18	7 340	0.22
13	6 632	1.04	2 721	0.91	22 807	0.95	32 160	0.96
14	15 739	2.47	9 669	3.22	428 196	17.79	453 604	13.56
15	59 626	9.36	22 247	7.41	269 161	11.18	351 034	10.50
16	55 584	8.73	9 849	3.28	50 245	2.09	115 678	3.46
17	58 936	9.26	2 924	0.97	41 094	1.71	102 954	3.08
21	436 132	68.49	252 503	84.08	1 589 601	66.04	2 278 236	68.13

11. 持续性严重退化;12. 持续性中度退化;13. 持续性轻微退化;14. 持续性不变;15. 持续性轻微增长;16. 持续性中度增长;17. 持续性显著增长;21. 无持续性变化。

表 5 自然因子对 *NDVI* 空间分布的影响

Table 5 The impact of natural factors on *NDVI* spatial distribution

区域	海拔	坡度	坡向	年均降水量	年均气温	年均日照时间	年均相对湿度	距离水域的距离
总体	0.0692	0.0886	0.0028	0.5728	0.1136	0.4063	0.4881	0.2027
黄河流域片区	0.2520	0.1816	0.0056	0.5264	0.4175	0.4677	0.4112	0.1487
半干旱草原片区	0.0712	0.1189	0.0103	0.6394	0.3836	0.6847	0.6051	0.2953
干旱内陆河片区	0.0973	0.0857	0.0013	0.3006	0.1104	0.1501	0.3072	0.1807

分区中,黄河流域片区影响植被覆盖程度最高的是年均降水量、其次是年均日照时间、年均气温、年均相对湿度;半干旱草原片区受年均日照时间、年均降水量、年均相对湿度的影响大;干旱内陆河片区受年均相对湿度、年均降水量的影响度大,距离水域的距离和年均气温次之。

为了进一步探讨研究区植被覆盖变化的影响因子,选取空间分布影响因子影响度较大的 4 个因子^[19]——降水、气温、日照、相对湿度与植被覆盖度进行相关分析。

降水与研究区 37.34%(通过 $\alpha=0.05$ 检验)的植被覆盖相关,其中 37.16% 为正相关,0.18% 为负相关,主要分布在黄河流域片区、半干旱草原片区以及内陆干旱片区东南部,土地利用类型以草地、耕地为主;气温与 9.04%(通过 $\alpha=0.05$ 检验)的植被覆盖相关,其中 3.67% 为正相关,5.37% 为负相关,主要分布在内陆干旱片区甘肃西南部、新疆北部地区、半干旱草原片区中部,土地利用类型以草地、耕地、未利用地为主;日照与 9.04%(通过 $\alpha=0.05$ 检验)的植被覆盖相关,其中 2.06% 为正相

关,6.98% 为负相关,主要分布范围、植被覆盖类型与气温相关性区域类似;相对湿度与 10.64%(通过 $\alpha=0.05$ 检验)的植被覆盖相关,其中 6.56% 为正相关,4.08% 为负相关,主要分布在内陆干旱片区,土地利用类型以草地、未利用地为主(图 6、表 6)。整体来看降水与植被覆盖的相关性最强,气温、日照、相对湿度较低,除黄河流域片区气温显著正相关性大于显著负相关区域外,研究区总体及各分区气温、日照均以显著负相关占优,降水、相对湿度以显著正相关占优。

2.3.2 人类活动与自然因子影响

研究区自然因子影响趋势空间分布及人类活动影响趋势空间分布(图 7)^[16]。研究区 46.53% 的区域植被变化受自然因子促进,促进区域以半干旱草原片区为主;29.78% 的区域植被变化受人类活动促进,促进区域以黄河流域片区为主;除半干旱草原片区受人类活动轻微抑制达 29.44% 外,其余各区受人类活动与自然因子抑制较低,均不足 10%。整体而言,人类活动与自然因子对植被变化以促进作用为主。

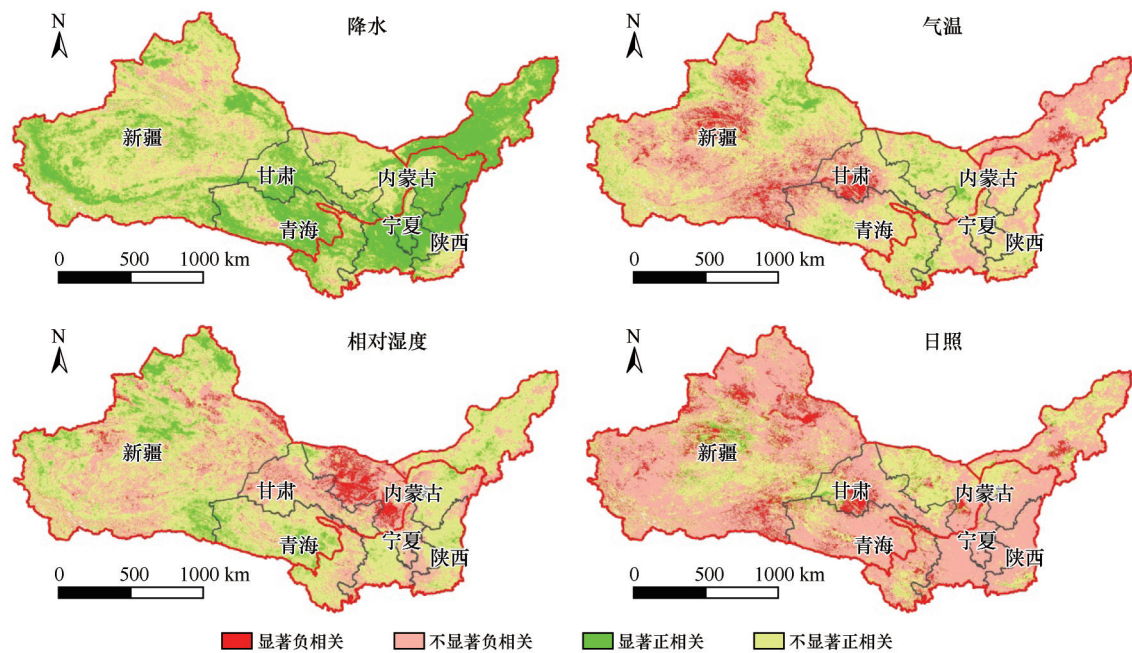


图 6 各因子与 *NDVI* 相关性空间分布

Fig.6 Spatial distribution of correlation between each factor and *NDVI*

表 6 不同分区各因子与 *NDVI* 的显著相关性面积

Table 6 The area of significant correlation between *NDVI* and factors in different regions

区域	面积 /km ²	降水/%		气温/%		日照/%		相对湿度/%	
		显著 正相关	显著 负相关	显著 正相关	显著 负相关	显著 正相关	显著 负相关	显著 正相关	显著 负相关
半干旱草原片区	300 305	74.51	0.02	0.04	4.52	1.71	2.85	4.00	0.57
黄河流域片区	636 830	60.23	0.15	2.78	0.58	0.54	2.82	2.90	0.85
内陆干旱片区	2 406 930	26.40	0.20	4.36	6.74	2.51	8.59	7.84	5.38
全区	3 344 065	37.16	0.18	3.67	5.37	2.06	6.98	6.56	4.08

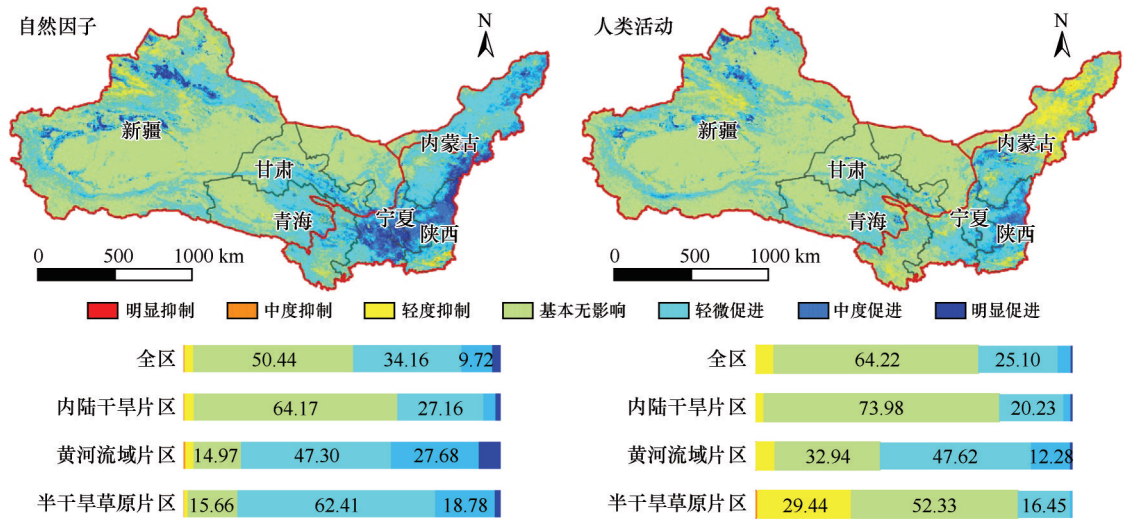


图 7 2000—2019 年自然因子与人类活动对研究区植被覆盖变化影响空间分布及主要影响区域面积百分比 (%)

Fig.7 Spatial distribution and main area percentage of the impacts of natural factors and human activities on vegetation cover change in study area during 2000–2019

为了揭示研究区植被变化的驱动机制及人类活动与自然因子的贡献率,采用表 1 的判定及计算方法对研究区植被变化做定性分析。去除植被变

化不明显区域,研究区植被变化多由自然因子与人类活动共同驱动,仅半干旱草原片区表现出较多的自然因子驱动增长(图 8)。

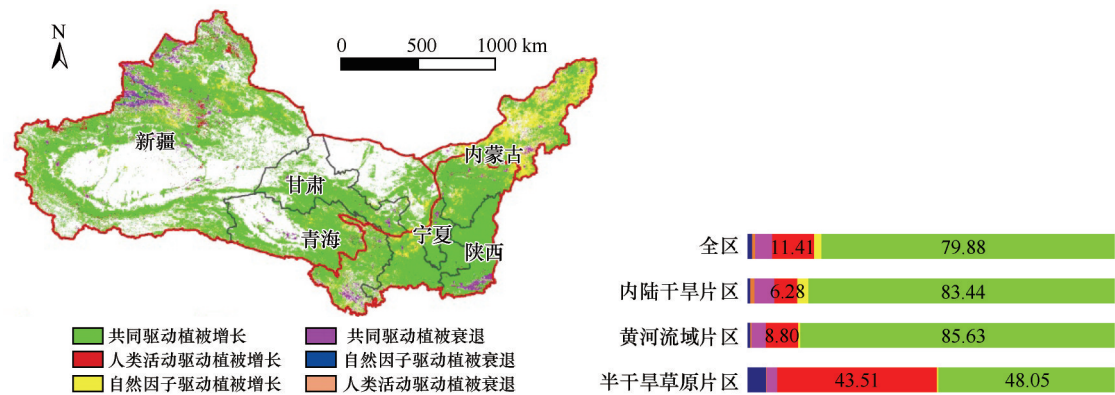


图 8 2000—2019 年研究区植被覆盖变化的驱动因素空间分布及主要区域面积百分比(%)

Fig.8 Spatial distribution and main area percentage of driving factors of vegetation change in the study area during 2000–2019

去除变化不明显区域,自然因子贡献率全区中以 40% 以上的区域居多,面积占比达 83.27% (表 7)。人类活动以 0—60% 的区域居多,面积占比达 83.42%。由图 9 可知自然因子贡献率大于 80% 的区域主要集中在半干旱草原片区与黄河流域

片区,对比自然因子相关性分析,降水在上述区域也表现出明显的正相关性。人类活动贡献大于 80% 的区域主要集中在半干旱草原片区与内陆干旱片区,半干旱草原片区的植被变化趋势以退化为主。

表 7 不同分区自然因子及人类活动贡献率面积占比(%)统计

Table 7 Statistics of contribution rate of natural factors and human activities in different regions

区域	植被变化 面积/km ²	贡献率									
		0—20%		20%—40%		40%—60%		60%—80%		80%—100%	
		人类活动	自然因子	人类活动	自然因子	人类活动	自然因子	人类活动	自然因子	人类活动	自然因子
半干旱草原片区	236 728	65.19	6.94	16.64	2.88	8.39	8.47	2.86	16.72	6.92	64.99
黄河流域片区	576 189	25.80	4.38	33.66	8.15	28.16	28.36	8.06	33.58	4.33	25.54
内陆干旱片区	1 186 471	22.45	8.46	31.67	11.69	25.90	26.06	11.60	31.57	8.38	22.22
全区	1 999 388	28.47	7.11	30.47	9.63	24.48	24.64	9.54	30.39	7.04	28.24

统计中去除了变化不明显区域。

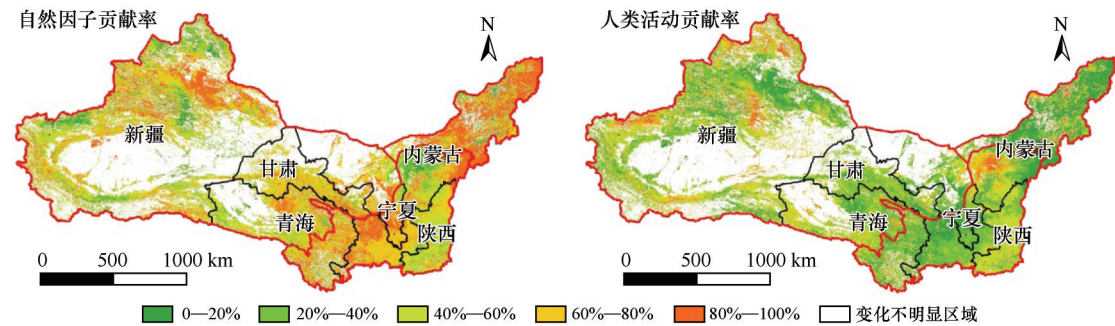


图 9 2000—2019 年自然因子与人类活动对研究区植被覆盖变化的贡献率空间分布

Fig.9 Spatial distribution of the contributions of natural factors and human activities on vegetation cover change in study area during 2000–2019

综上,研究区植被覆盖变化是人类活动与自然因子共同作用的结果,自然因子对研究区植被覆盖变化的影响最大。

比人类活动的贡献率大,自然因子中降水对植被覆盖变化的影响最大。

3 结论

近20年,西北地区植被覆盖总体呈增长趋势,*NDVI*均值为0.252,年平均增长速率为0.0027。研究区内植被覆盖空间差异较大,黄河流域片区植被覆盖最高且增长率最大,*NDVI*均值为0.504,年平均增长率为0.0055,半干旱草原片区次之(0.348),且波动变化较大,内陆干旱片区植被覆盖平均较低且增长相对较慢,*NDVI*均值和年平均增长率分别为0.173和0.0018。

*NDVI*空间差异与下垫面土地利用类型密切相关,黄河流域片区土地利用类型以高植被覆盖率的耕地、林地、草地为主(占86.36%),半干旱草原区土地利用类型以低矮禾草形成的草地为主(占76.29%),而内陆干旱片区除山地和绿洲地区外,基本以较低植被覆盖率的沙漠、荒漠和戈壁形成的未利用地为主(占63.55%),不同分区的土地利用类型使得西北地区*NDVI*空间差异较大。

研究区植被覆盖增长区域占总面积的55.77%,退化区域仅占3.76%,并且持续性改善区域的面积远大于持续性退化的面积,表明西北地区生态环境会进一步向好发展。在黄河流域片区,植被覆盖增长区域占85%以上,且增长趋势具有持续性的区域占27%以上,而半干旱草原片区和内陆干旱片区植被覆盖增长区域分别占子区面积的72.48%和45.72%,具有持续性的区域仅占11.66%和14.98,说明黄河流域片区的生态环境改善程度明显优于半干旱草原片区和内陆干旱片区,在未来一定时段内黄河流域片区的领先优势将会继续保持。

研究区植被覆盖变化以自然因子与人类活动共同驱动为主,自然因子对植被生长的促进作用大于人类活动,有46.53%区域受自然因子促进,29.78%的区域植被变化受人类活动促进。气候变化背景下,中国西北地区呈暖湿化趋势,多数地区年平均气温变化率高于0.03℃,降水年变化率在0—1 mm,且增加趋势显著^[19],气温升高、降水增加能够促进植被生长^[20],进而使植被覆盖增加。另外,人类对植被的保护和生态修复,如退耕还林还草工程^[21]、封山禁牧^[22]等保护措施,对植被变化也有较大的促进作用。

参考文献:

- [1] 毛转梅,陈劲松,彭尔瑞,等.甘肃省植被覆盖时空变化趋势研究[J].江西农业学报,2020,32(3):125-130.
- [2] Lian J, Zhao X, Li X, et al. Detecting sustainability of desertification reversion: vegetation trend analysis in part of the agro-pastoral transitional zone in Inner Mongolia, China[J]. Sustainability, 2017, 9(2): 1-15.
- [3] Faour G, Mhawej M, Nasrallah A, et al. Global trends analysis of the main vegetation types throughout the past four decades[J]. Applied Geography, 2018, 97: 184-195.
- [4] Ibrahim Y Z, Balzter H, Kaduk J, et al. Land degradation assessment using residual trend analysis of GIMMS *NDVI*3g, soil moisture and rainfall in sub-Saharan West Africa from 1982 to 2012[J]. Remote Sensing, 2015, 7(5): 5471-5494.
- [5] 马明国,董立新,王雪梅.过去21 a中国西北植被覆盖动态监测与模拟[J].冰川冻土,2003,25(2):232-236.
- [6] 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.
- [7] 肖建勇,王世杰,白晓永,等.喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素[J].生态学报,2018,38(24):138-151.
- [8] Hammadi A, Ahmed T, Touhami R, et al. Forest cover in Tunisia before and after the 2011 Tunisian Revolution: a spatial analysis approach[J]. Journal of Geovisualization & Spatial Analysis, 2018, 2: 10.
- [9] 邓铭江.中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J].地理学报,2018,73(7):1189-1203.
- [10] 宋怡,马明国.基于SPOT VEGETATION数据的中国西北植被覆盖变化分析[J].中国沙漠,2007,27(1):89-93.
- [11] 王娟,李宝林,余万里.近30年内蒙古自治区植被变化趋势及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(2):132-138.
- [12] 王旭洋,李玉霖,连杰,等.半干旱典型风沙区植被覆盖度演变与气候变化的关系及其对生态建设的意义[J].中国沙漠,2021,41(1):183-194.
- [13] 庞静.基于地理探测器模型的自然和人为因素对植被变化的影响[D].太原:山西大学,2016.
- [14] 严恩萍,林辉,党永峰,等.2000-2012年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征[J].生态学报,2014,34(17):5007-5020.
- [15] 张华,安慧敏.基于GEE的1987-2019年民勤绿洲*NDVI*变化特征及趋势分析[J].中国沙漠,2021,41(1):28-36.
- [16] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [17] 马永桃,任孝宗,胡慧芳,等.基于地理探测器的浑善达克沙地植被变化定量归因[J].中国沙漠,2021,41(4):195-204.
- [18] 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.
- [19] 舒章康,张建云,金君良,等.1961-2018年中国主要江河枯季径流演变特征与成因[J].气候变化研究进展,2021,17(3):340-351.
- [20] 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.
- [21] 李依璇,朱清科,石若莹,等.2000-2018年黄土高原植被覆盖时空变化及影响因素[J].中国水土保持科学,2021,19(4):

60–68.

局演变[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(5):

[22] 张建香, 胡爱萍, 张多勇. 陕甘宁黄土高原区植被覆盖空间格

71–76.

Vegetation coverage change and its influencing factors across the northwest region of China during 2000–2019

Yin Zhenliang¹, Feng Qi¹, Wang Lingge², Chen Zexia², Chang Yabin², Zhu Rui²

(1. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Faculty of Geomatics / National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring / Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The problem of land desertification in northwest region of China is serious and the ecological environment is severe. It is of great significance to clarify the spatio-temporal variation characteristics and driving factors of vegetation cover in this area for ecological environment protection. In this study, MOD13A3 products in this area were used as the data source to obtain the *NDVI* sequence set from 2000 to 2019 through the maximum value synthesis method. Trend analysis, anomaly analysis, Hurst index, geographic detector, correlation analysis and residue analysis were used to analyze the spatiotemporal variation characteristics and impact factors of vegetation cover in the study area. The results showed that: (1) In recent 20 years, the vegetation coverage in the study area showed an overall growth trend, with an increase rate of $0.0027 \cdot a^{-1}$ and an average *NDVI* of 0.252. However, the growth rate of the Yellow River basin area ($0.0062 \cdot a^{-1}$) is higher than that of the semi-arid grassland area ($0.0026 \cdot a^{-1}$) and inland arid area ($0.0018 \cdot a^{-1}$). (2) The vegetation coverage in the study area is on the rise, accounting for 55.77% of the total area, while the degraded area accounts for 3.76% of the total area. The increased land use types were mainly tillage, forest and grassland. The area with sustainable change trend of vegetation cover accounted for 31.87% of the total area, the sustainable improvement (17.04%) was greater than the sustainable degradation (1.27%), and the growth and sustainable growth of the Yellow River basin area were the best. (3) The main contributing factors that affect the spatial distribution of vegetation cover are precipitation, temperature, sunshine and relative humidity in order of influence, but the influence degree of each sub-region is slightly different. The spatial distribution of arid areas in the Yellow River basin and inland is most affected by precipitation, and the semi-arid grassland is most affected by sunshine. (4) Vegetation cover changes is mainly driven by natural factors and human activities, and natural factors on the growth of vegetation role in promoting are greater than human activity, and natural factors on vegetation cover change in the rate of contribution are higher. The results of this study can provide reference for assessing the ecological environment change under the background of climate change in northwest China.

Key words: northwest region; *NDVI*; vegetation coverage change; influencing factor; GeoDetector; Hurst index