

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.012; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.012.

封建民, 郭玲霞, 刘宇峰, 等. 2000—2021 年泾河流域植被 NDVI 变化及影响因素[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1):249-256.

Feng Jianmin, Guo Lingxia, Liu Yufeng, et al. The spatiotemporal changes and its influencing factors of vegetation NDVI in the Jinghe River Basin from 2000 to 2021[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1):249-256.

# 2000—2021 年泾河流域植被 NDVI 变化及影响因素

封建民<sup>1</sup>, 郭玲霞<sup>1</sup>, 刘宇峰<sup>1</sup>, 文琦<sup>2</sup>

(1. 咸阳师范学院 地理与环境学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 宁夏大学 建筑学院, 银川 750021)

**摘要:** [目的] 了解近 20 多年来泾河流域植被时空变化情况, 探析气候变化、人类活动对植被变化的影响, 为科学评估区域生态环境质量和建设成效提供科学依据。 [方法] 基于 2000—2021 年 NDVI、气温、降水、人口密度、土地利用数据, 采用趋势分析、相关性分析等对泾河流域 NDVI 的时空变化及其影响因素进行了研究。 [结果] (1) 2000—2021 年, 泾河流域 NDVI 呈增加趋势, 全区平均增速为 0.059/10 a。 (2) 气温、降水与 NDVI 总体均呈正相关关系, 气候变化有利于植被改善, 且降水变化对 NDVI 的影响大于气温的影响。 (3) 人口密度变化与 NDVI 变化趋势呈负相关, 流域人口密度的减小有利于植被的恢复和改善。 (4) 土地利用类型内部变化是 NDVI 变化的主要原因。 NDVI 显著减小的主要原因是关中平原耕地 NDVI 的减小, 而 NDVI 显著增加的主要原因是草地、林地以及黄土丘陵区、黄土残塬区耕地 NDVI 的增加。 [结论] 研究时段内, 气候变化对泾河流域植被的改善有积极作用, 同时, 农业生产技术的提高, 生态移民、退耕还林、生态修复等政策的实施是植被覆盖上升的重要因素。

**关键词:** NDVI; 时空变化; 气候变化; 人口密度; 土地利用; 泾河流域

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0249-08

## The spatiotemporal changes and its influencing factors of vegetation NDVI in the Jinghe River Basin from 2000 to 2021

Feng Jianmin<sup>1</sup>, Guo Lingxia<sup>1</sup>, Liu Yufeng<sup>1</sup>, Wen Qi<sup>2</sup>

(1. School of Geography and Environment, Xianyang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000, China; 2. School of Architecture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to understand the spatiotemporal changes of vegetation in the Jinghe River basin in the past 20 years, to explore the impacts of climate change and human activities on vegetation change, so as to provide scientific basis for assessment of regional eco-environmental quality and construction effectiveness. [Methods] Based on NDVI, temperature, precipitation, population density, land use data from 2000 to 2021, the spatiotemporal variation characteristics of vegetation NDVI and its influencing factors in the Jinghe River basin were studied by using trend analysis and correlation analysis. [Results] (1) During the past 22 years, vegetation NDVI in the Jinghe River basin increased significantly, with an average growth rate of 0.059/10 a. Spatially, NDVI in the Guanzhong Plain located in the southern of the study area showed a decreasing trend, while it increased significantly in most of the northern part of the study area. (2) On the interannual scale, temperature and precipitation had a positive correlation with NDVI. Climate change was beneficial to vegetation improvement, and the impact of precipitation on NDVI was greater than that of temperature. (3) The change of population density was negatively correlated with the change of NDVI, which indicated that the decrease of population density was beneficial to the restoration and improvement of vegetation. (4) The internal change of land use type was the main cause of vegetation NDVI change, and the decreasing trend of NDVI in the significant decreasing area was mainly caused by the

收稿日期: 2024-01-16

修回日期: 2024-03-26

资助项目: 国家自然科学基金(42061037); 陕西省创新能力支撑计划项目(2023-CX-RKX-063); 陕西省高等教育改革研究项目(23BY146)

第一作者: 封建民(1972—), 男, 陕西凤翔人, 博士, 教授。主要从事土地利用与景观生态研究。E-mail: feng\_jianmin@aliyun.com

<http://stbcjy.paperonice.org>

decreasing of farmland NDVI in Guanzhong Plain, the increasing trend of NDVI was mainly caused by the increase of NDVI in grassland, woodland, loess hilly area and loess remnant plateau. [Conclusion] The Jing River basin is located in semi-arid-semi-humid transition zone, where vegetation cover is greatly affected by climate and human activities. During the study period, climate change had a positive effect on the improvement of vegetation. At the same time, the improvement of agricultural production technology, the implementation of policies such as ecological migration, land conversion and revegetation, and ecological restoration were important factors on the increase of vegetation cover.

**Keywords:** NDVI; spatiotemporal changes; climate change; population density; land use; Jinghe River Basin

植被是陆地生态系统重要的组成部分,在地球物质循环和能量流动中发挥着极为重要的作用<sup>[1-2]</sup>。区域植被生长状况和变化可以反映该地区生态环境质量及建设成效<sup>[3]</sup>。全球气候变化和人类活动对植被的生长变化产生了深远的影响,特别是在区域尺度上表现得尤为明显<sup>[4]</sup>。近年来随着社会发展,人们对生态环境质量的关注度不断提高,利用长时间序列、高分辨率、大范围的遥感数据监测植被变化过程,量化评价全球变化和人类活动对植被生长状态的影响成为国内外学者研究的热点<sup>[5-6]</sup>。在众多的遥感数据中,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)对植被的生长状态较为敏感,可直接反映植被生长状态和变化程度,因而在植被变化检测、生态环境状况评价等研究中得到广泛应用<sup>[7-9]</sup>。

泾河流域是黄河中游重要的生态涵养地,因其地处黄土高原沟壑区,生态环境脆弱,加之区内土地开发历史悠久,受自然条件和人类活动的共同支配,植被覆盖相对较低,亦使其成为黄土高原水土流失的典型区域。在加强黄河流域生态保护的大背景下,研究植被覆盖时空变化及其影响因素,不仅可以为提高泾河流域植被覆盖度、改善植被生长状况、减少水土流失提供理论依据,而且对进一步加强黄土高原乃至整个黄河流域生态环境恢复具有重要现实意义。目前,关于黄土高原植被覆盖变化的研究较多,而对泾河流域的研究极少<sup>[10]</sup>,且由于所用数据分辨率较低、时间较早,不能很好地反映退耕还林工程实施以来,泾河流域植被状况的变化情况以及定量给出气候因子和人类活动对植被恢复的影响。为此,本文采用 2000—2021 年 500 m 分辨率的 MODIS 数据,以植被 NDVI 的时序变化为切入点,探究气温、降水等气候因子与 NDVI 的相关性,评估泾河流域植被生长变化与气候变化的关系,分析人口密度、土地利用等人为因素对泾河流域植被变化的影响,以期对改善流域生态环境及制定相关保护政策提供科学依据。

## 1 研究区概况

泾河全长 455.1 km,为渭河的一级支流、黄河的

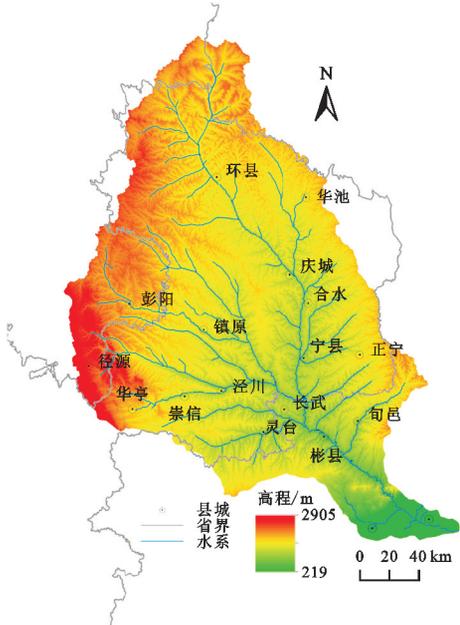
二级支流,发源于宁夏回族自治区泾源县,自西北向东南流经宁夏、甘肃、陕西三省(区),于陕西省高陵县注入渭河。流域面积 45 421 km<sup>2</sup>,介于 106°14′—108°42′E,34°46′—37°19′N,地势西北高,东南低,总体上由东北西三面向东南倾斜(图 1)。流域深处大陆,为典型的温带大陆性气候,多年平均气温 8℃左右,最冷月平均气温 -8~-10℃,最热月平均气温 22~24℃,多年平均降水量 511 mm,降水季节分配差异较大,5—9 月汛期降水量占年降水总量的 72%~86%;冬春季降水稀少<sup>[11]</sup>。流域内黄土分布广泛,除六盘山局部地区外,大部分地区被黄土覆盖,土层深厚,多在 50~80 m 不等,最厚处超过 100 m。流域植被稀疏,北部为典型温带草原区,植被以草地为主,南部以耕地为主,东西两侧有少量的林地(图 2)。明清时期以来,随着流域人口快速稳定增长,黄土沟壑区许多地方被开垦为农田,原始以草地、灌丛为主的自然植被遭到破坏,加之泾河及各支流的切割侵蚀,流域内地形支离破碎,沟壑纵横,使其成为黄土高原水土流失的典型区域。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

本研究采用的数据主要有 2000—2021 年泾河流域 NDVI、气温、降水、人口密度、土地利用数据等。NDVI 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)和 LAADS DAAC 官网(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),空间分辨率为 500 m,时间分辨率 15 d,采用最大值合成法生成逐月、逐年 NDVI。气温、降水逐月数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>),空间分辨率为 1 km,经过运算、投影变换、重采样、裁剪得到研究区域 NDVI 相同分辨率的逐月、逐年气温、降水数据集。人口密度数据下载自 <https://www.worldpop.org/> 网站,该数据空间分辨率为 1 km,在 ArcGIS 软件中裁剪、重采样得到泾河流域 500 m 分辨率的人口密度数据。土地利

用数据来源于参考文献<sup>[12]</sup>,在 ArcGIS 软件按一级土地利用类型进行重分类。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2023)2767 号的标准地图制作,地图未做修改,下同。

图 1 泾河流域位置示意图

Fig. 1 Location map of the Jinghe River basin

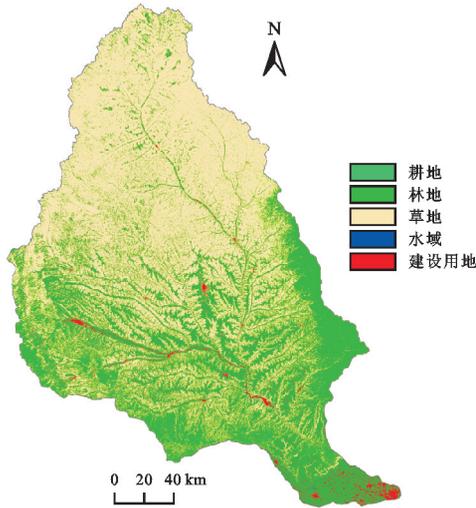


图 2 泾河流域 2021 年土地利用现状图

Fig. 2 Map of land use in the Jinghe River basin in 2021

## 2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析 为得到多年 NDVI、气温、降水的变化趋势,综合分析泾河流域多年植被指数和气候因素的变化方向和速率,采用一元线性回归分析方法,逐像元拟合近 22 年间每个栅格的斜率 Slope<sup>[13]</sup>。其计算公式如下:

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

式中:Slope 为像元回归方程的斜率;NDVI<sub>i</sub> 为第 i 年

的 NDVI 值;n 为研究时段的长度。Slope 的符号表示变化方向,正值表示上升趋势,负值表示下降趋势,其值的大小表示上升或下降的速率。为了进一步评价植被覆盖变化状况,采用 F 检验法,对 NDVI 变化趋势进行显著性检验。根据显著性检验结果 F 值和 Slope 值,在  $\alpha=0.05$  的显著性水平上,将植被变化趋势分为 4 个等级:显著减少(Slope<0,  $F \geq 4.351$ );不显著减少(Slope<0,  $F < 4.351$ );显著增加(Slope>0,  $F \geq 4.351$ );不显著增加(Slope>0,  $F < 4.351$ )。

2.2.2 相关分析 为揭示气候因素对植被生长状况的影响,定量分析植被生长季 NDVI 与气温、降水的相关性,基于像元空间分析法,逐像元计算每个栅格 NDVI 与气温和降水的简单相关系数,在此基础上,采用偏相关分析法,计算得到偏相关系数,并采用 T 检验法进行显著性检验。其计算公式如下:

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

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (3)$$

$$t = \frac{r_{xy \cdot z}}{\sqrt{1 - r_{xy \cdot z}^2}} \sqrt{n - m - 1} \quad (4)$$

式中: $r_{xy}$  为变量 x 和 y 的简单相关系数; $x_i, y_i$  分别表示第 i 年变量 x 和 y 的值, $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别表示变量 x 和 y 多年平均值;n 为研究时段的长度; $r_{xy \cdot z}$  为变量 z 固定后变量 x 与 y 的偏相关系数;t 为显著性检验结果;m 为自变量个数。

## 3 结果与分析

### 3.1 2000—2021 年泾河流域植被 NDVI 变化趋势

2000—2021 年年平均 NDVI 呈明显的增加趋势,增加幅度为 0.005 9/a, NDVI 变化范围在 0.541~0.746,多年平均值为 0.651,最大值出现在 2013 年为 0.746,超过平均值的 11.46%,最小值出现在 2000 年为 0.541,低于多年平均值 16.9%;其中 2000—2009 年 NDVI 普遍较低,均在 0.64 以下,2010 年以来多数年份大于 0.7,2013 年达到最大值,其后除 2016 年、2017 年低于 0.64 外,其他年份基本在 0.66~0.75 的高位波动(图 3)。空间上,流域多年 NDVI 总体上由南向北呈递减趋势,南部农垦区、六盘山、子午岭山区 NDVI 较高,普遍在 0.68 以上,而北部草原区 NDVI 较低,大部分在 0.6 以下(图 4)。

流域 NDVI<sub>max</sub> 变化速率在 -0.033~0.024,平均值 0.005 9,其中 94.0% 的区域呈增加趋势(Slope>0);仅有 6.0% 的区域 NDVI 呈减少趋势(Slope<0),这表明

2000—2021 年泾河流域大部分地区植被生长状况得到改善。对 NDVI 变化率进行 F 检验,在 0.05 的显著性水平上,得到多年 NDVI 变化趋势的显著性分布(图 5)。流域内 62.36% 的区域 NDVI 显著增加;31.64% 的区域 NDVI 呈现不显著的增加趋势;NDVI 减小的区域仅占 6.0%,其中显著减小 1.4%,不显著减小 4.6%。流域 NDVI 变化趋势与地貌类型具有较好的对应关系。NDVI 呈显著减少趋势的像元集中分布在最南部的低地平原区;NDVI 显著增加的区域集中连片分布于中部的黄土残塬区;黄土丘陵沟壑区、河谷阶地以及东南部山川区 NDVI 变化不显著,大部分呈现不显著的增加趋势,少数区域呈现不显著的减少。

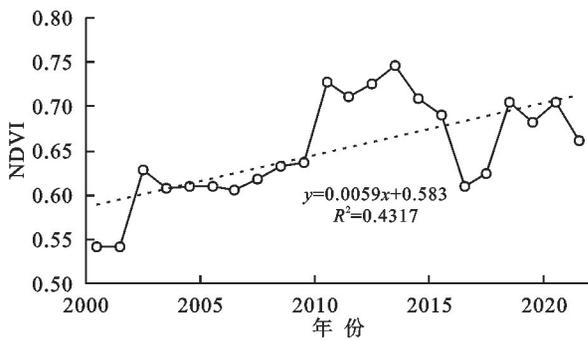


图 3 2000—2021 年泾河流域 NDVI 变化

Fig. 3 NDVI changes in the Jinghe River basin from 2000 to 2021

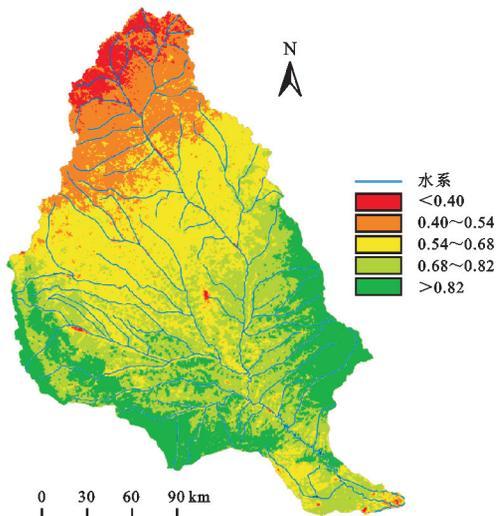


图 4 2000—2021 年泾河流域 NDVI 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of NDVI in the Jinghe River basin

### 3.2 2000—2021 年泾河流域气候因子与植被 NDVI 的相关性分析

近 20 多年来,在全球气候变化的大背景下,泾河流域气候变化显著,由 2000—2021 年年平均气温和年降水量线性拟合方程推算,温度上升速率约为  $0.262\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,降水增加速率为  $12.13\text{ mm}/10\text{ a}$ 。大量研究表明,气候变暖是造成植被生长期延长的主要原因,而在干旱半干旱的黄土高原地区,水分条件是

植被生长的制约因子,降水对植被的生长和空间分布具有决定性意义<sup>[3,14-15]</sup>。2000—2021 年泾河流域 NDVI 增加趋势明显,在植被生长季的 5—9 月,其增长速率均在  $0.06/10\text{ a}$  以上,尤其是 6 月和 7 月分别达到了  $0.084/10\text{ a}$  和  $0.087/10\text{ a}$ ,这是泾河流域植被生长状态对气候变化响应的结果。

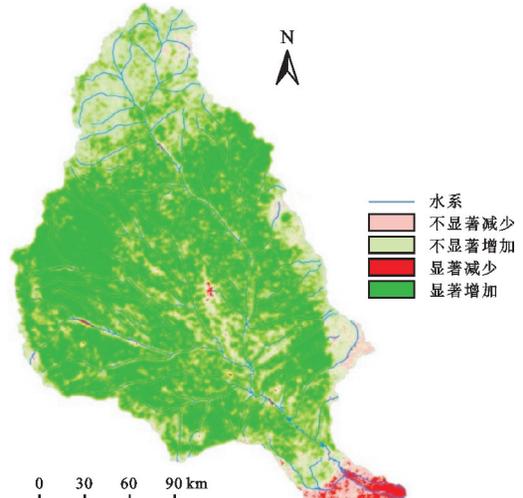


图 5 泾河流域 2000—2021 年 NDVI 变化趋势

Fig. 5 NDVI changing trends in the Jinghe

River basin during 2000—2021

逐栅格计算 2000—2021 年期间年最大 NDVI 与年平均温度和年降水量的偏相关系数,并在 0.05 显著性水平上,对植被 NDVI 与气温及降水的偏相关系数进行 t 检验。可以看出,2000—2021 年,泾河流域植被最大 NDVI 与年平均气温和年降水的正相关性和负相关性共存,整体上均呈现正相关关系,且植被 NDVI 对气温、降水的响应表现出明显的空间异质性。统计显示 NDVI 与年平均气温的偏相关系数介于  $-0.79\sim 0.84$ ,整体平均相关系数为 0.122 5,正、负相关的面积分别占流域总面积的 77.63% 和 22.37%;通过  $p < 0.05$  显著性检验的面积占 31.58%,其中,显著正相关占 23.55%,不显著正相关占 54.08%,集中于中部黄土残塬区;显著负相关占 8.03%,主要分布于最南部的低地平原和最北部的黄土丘陵沟壑区,零星分布于河谷阶地;不显著负相关占 14.34%,零星分布在研究区内。NDVI 与降水的偏相关系数介于  $-0.61\sim 0.86$ ,整体平均相关系数为 0.139 9,正、负相关的面积分别占流域总面积的 91.17% 和 8.83%;通过  $p < 0.05$  显著性检验的面积占 11.55%,其中,显著正相关占 11.25%,主要分布于最南部的低地平原和最北部的黄土丘陵沟壑区,不显著正相关占 79.92%,集中于中部黄土残塬区;显著负相关仅占 0.3%,零星分布于南部低地平原与中部黄土残塬区的过渡地带;不显著负相关占 8.53%,零星分布在研究区内(图 6)。

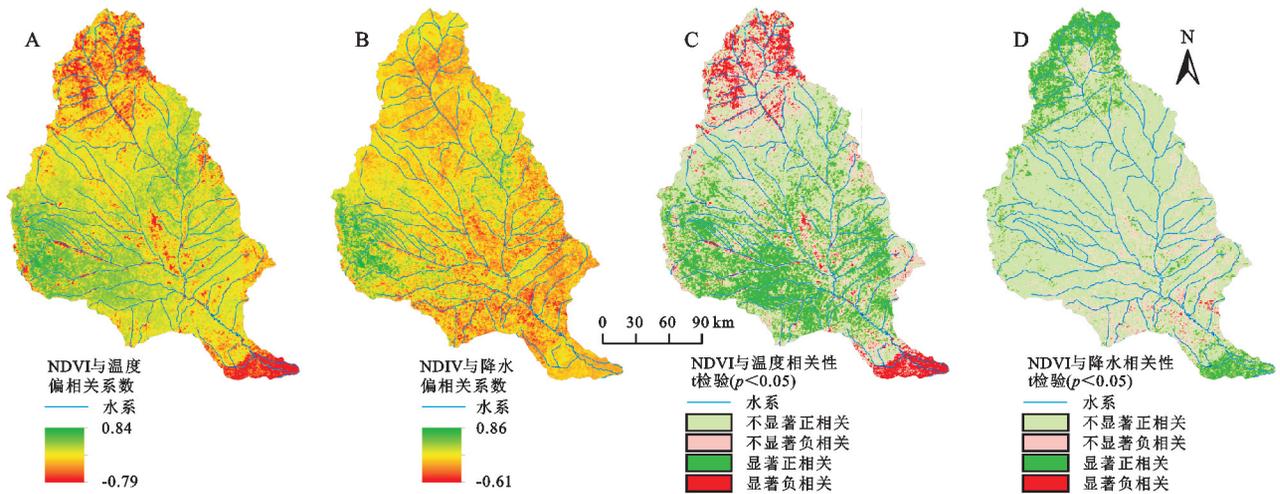


图 6 泾河流域 2000—2021 年 NDVI 与气温、降水的相关性及显著性检验

Fig. 6 Correlation and significance test of NDVI with temperature and precipitation in the Jinghe River basin during 2000—2021

### 3.3 2000—2021 年泾河流域人为因素对植被 NDVI 的影响

区域人口分布及迁移在一定程度上会改变人类对环境的压力,而政策导向、生产技术改进、经济发展等会改变人类土地利用方式,从而对植被生长状态产生巨大影响。因而,短期来看,相比于气候因素,人类活动对植被覆被和生长状态的影响更为活跃和直接。

#### 3.3.1 人口分布及空间重组对植被 NDVI 的影响

利用研究区 2000—2020 年人口密度数据集,在 ArcGIS 软件中利用 mean 合成法生成多年平均人口密度空间分布数据,并按常用等级划分标准将人口密度划分为 4 个等级(人口密集区 >100 人/km<sup>2</sup>,人口中等区 25~100 人/km<sup>2</sup>,人口稀少区 1~25 人/km<sup>2</sup>,人口极稀区 <1 人/km<sup>2</sup>)(图 7A)。可以看出,人口密度的空间分布与植被 NDVI 的空间分布有很好的相关性,除最北部黄土丘陵沟壑区由于环境恶劣,人口密度和植被 NDVI 均较低外,大部分地区两者存在反向关系,即人口密度大的地区,NDVI 小,如关中平原和河川,人口密集,NDVI 较低,而山区人口稀少,NDVI 普遍大于 0.8。通过区域分析方法,提取了不同人口密度等级 NDVI 平均值,结果显示人口密集区、中等区、稀少区和极稀区的平均 NDVI 分别为 0.711 8,0.713 6,0.623 1,0.892 9。

人口的空间分布是人与自然长期相互作用、相互适应的结果,它与植被的空间分布、生长状态等都会受到自然环境和人类活动的共同影响,他们二者的空间分布密切相关,因而区域人口空间分布的变化势必对植被产生影响。近 20 多年来,泾河流域人口数量呈减少趋势,在退耕还林、移民政策的实施、社会发展、城镇化快速推进等的共同作用下,人口的空间分布发生了很大的变化。对泾河流域 2000—2021 年

人口密度数据做时间序列趋势分析,在  $\alpha=0.05$  的水平上做显著性检验,结果显示,人口密度不显著减少、显著减少、不显著增加、显著增加的面积分别占流域总面积的 27.75%,43.55%,22.13%和 6.57%,空间上与多年平均人口密度分布基本一致,即人口密度大的地区其增加趋势越明显,而人口密度减小的像元基本分布在人口中等区和稀少区(图 7B)。

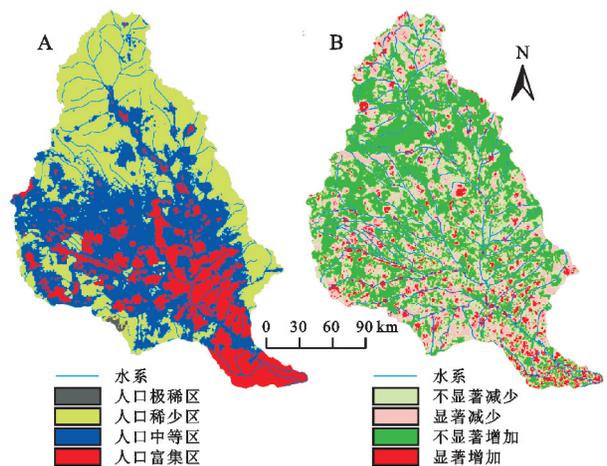


图 7 泾河流域多年平均人口密度(A)及变化趋势显著性检验(B)

Fig. 7 Multi-year mean population density and significance test of changing trend in the Jinghe River basin

对人口密度变化和植被变化做相关分析,统计结果表明,二者的相关系数介于-0.979 7~0.951 5,平均相关系数为-0.232 2,总体上二者呈负相关关系,说明流域人口密度的减小有利于植被恢复和改善。为进一步分析人口迁移、空间重组对植被 NDVI 变化趋势的影响,将人口密度变化趋势显著性检验结果与植被 NDVI 变化趋势显著性检验结果叠加,计算了不同植被 NDVI 变化趋势等级在各人口密度变化趋势等级中的分布(表 1)。可以看出,71.04%的地区

NDVI 与人口密度呈现相反的变化趋势,其中人口密度减小 NDVI 增加的区域为 68.17%,人口密度增加 NDVI 减小的区域为 2.87%,同时有 28.96%的区域 NDVI 与人口密度变化趋势相同,其中 3.13%的地区人口密度和 NDVI 均减小,25.83%的地区人口密度和 NDVI 均增加。

表 1 不同植被 NDVI 变化趋势等级在各人口密度变化趋势等级中的分布

Table 1 Distribution of NDVI change trend grades of different vegetation types in population density change trend grades %

植被 NDVI 变化趋势等级	人口密度变化趋势等级			
	不显著减少	显著减少	不显著增加	显著增加
不显著减少	1.05	1.45	1.24	0.86
显著减少	0.27	0.36	0.32	0.46
不显著增加	9.20	12.71	7.52	2.20
显著增加	17.23	29.03	13.05	3.05

3.3.2 土地利用对植被 NDVI 的影响 泾河流域土地利用类型以草地、耕地和林地为主,分别占研究区总面积的 52.13%~56.09%,30.85%~37.72%和 9.5%~13.39%,建设用地占 0.41%~1.05%,其他类型极少,占 0.3%以下。逐年提取主要土地利用类型植被 NDVI 平均值,结果显示,总体上林地>耕地>草地和建设用地,其中林地小幅增长,耕地和草地快速增长,建设用地在 2013 年前小幅增长,而其后快速下降,总体呈下降趋势(图 8)。

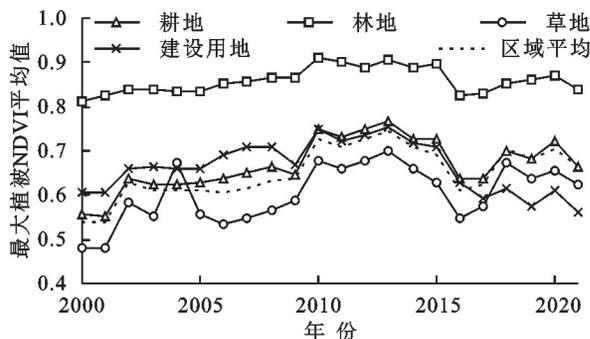


图 8 泾河流域 2000—2021 年主要土地利用类型植被 NDVI 变化趋势

Fig. 8 NDVI changing trend of main land use types in the Jinghe River basin from 2000 to 2021

由 2000 年和 2021 年土地利用数据得到土地利用变化数据,并与植被 NDVI 变化趋势显著性检验结果叠加,分析 NDVI 不同变化趋势下土地利用类型的转化情况。统计结果显示,不同 NDVI 变化趋势中均以土地利用类型内部转化为主,但各主要土地利用转化类型在不同 NDVI 趋势中的比例分布存在较大差异。在 NDVI 不显著减少区,耕地的内部转

化占 47.05%,林地的内部转化占 25.32%,草地的内部转化占 13.65%,建设用地的内部变化占 2.31%,土地利用类型发生变化的主要是耕地—草地和耕地—建设用地,分别占 3.81%和 3.42%;NDVI 显著减少区,耕地的内部转化占 67.56%,建设用地的内部转化占 7.12%,土地利用类型发生变化的主要是耕地—建设用地,占比 18.84%;NDVI 不显著增加区,草地的内部转化占 44.59%,耕地的内部转化占 27.29%,林地的内部转化占 14.86%,土地利用类型发生变化的主要是耕地—草地,占 6.7%;NDVI 显著增加区,草地的内部转化占 47.07%,耕地的内部转化占 25.76%,林地的内部转化占 5.90%,土地利用类型发生变化的主要是耕地—草地,占比 9.79%。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

2000—2021 年,植被 NDVI 呈增加趋势,NDVI 变化趋势与地貌类型具有较好的对应关系。这一研究结果与同期泾河流域的相关研究结果基本一致<sup>[13]</sup>,而与早期的相关研究结果有较大差异<sup>[10]</sup>,说明 2000 年以来流域 NDVI 变化趋势发生了明显的改变,这可能与 2000 年以来退耕还林还草、生态修复等政策的实施有关。

近 22 年来,泾河流域气温和降水均呈增加趋势,气温和降水与 NDVI 总体呈正相关关系,气候变化有利于植被改善,且降水变化对植被 NDVI 的影响大于气温的影响。这与相关或周边地区的研究结果一致<sup>[3,10-13,16-18]</sup>,而与相距较远的东部、西南等地区的相关研究结果并不一致<sup>[4,15,19-21]</sup>,这可能是由于气候变化以及对植被的影响具有区域差异性。从植被生长季月气温、降水对 NDVI 变化趋势影响来看,5 月和 7 月降水、温度与 NDVI 相关性较大。这主要有 2 个原因,一是气候变化的时间差异,5 月和 7 月气候变化较其他月份更为显著;二是植被物候的影响,5 月大部分地区植被处于生长初期,降水增加有利于植被恢复生长,但温度升高使地表蒸散发上升,加剧了水分流失,造成土壤干层的发育,从而对植被生长造成抑制<sup>[3]</sup>,而 7 月大部分地区植被处于生长茂盛期,充足的水分条件是植被生长的必要条件,同时由于气温达到全年最高,气温升高可能造成植物生长进入休眠期,不利于植被生长。

近 20 多年来,泾河流域人口向人口聚集区集中的趋势明显,其他区域人口密度显著下降,促使其他区域的植被的恢复和改善。人口密度变化与植被 NDVI 变化呈现显著的负相关关系,人口密度的减小

会显著改善植被的生长状况,这与一些相关研究结果一致<sup>[21-23]</sup>。统计结果显示,68.17%的区域人口密度减小 NDVI 增加,这很好地印证了通过生态移民、改变生产方式等,减少过多人口对环境的压力,是生态脆弱区植被恢复和改善的有效途径。另外,3.13%的地区人口密度和 NDVI 均减小,空间上主要分布在高山、山区向平原过渡的边坡地带,可能是由于这些地区虽然人口密度小,但同时自然环境恶劣,仅靠减少人口压力难以恢复和改善植被状况,需要借助生物、工程等技术手段;25.83%的地区人口密度和 NDVI 均增加,空间上呈点状分布在河流沿岸和居民点附近,这可能与生态修复工程的实施有关。

土地利用对植被 NDVI 的影响可以分为两个方面:土地利用类型内部变化和土地利用类型之间的转化<sup>[10]</sup>。泾河流域土地利用类型以草地、耕地、林地、建设用地为主,近 20 多年来,虽然他们所占比例有增减变化,但四者始终占研究区总面积的 99.76%以上。宏观土地利用格局并未发生结构性的变化。因而,土地利用类型内部变化是植被 NDVI 变化的主要原因。耕地的内部变化是 NDVI 显著减小区 NDVI 呈减小趋势的主要原因,草地、耕地、林地的内部转化是 NDVI 显著增加区 NDVI 呈增加趋势的主要原因。空间分布上,耕地 NDVI 减小的区域主要分布在关中平原,主要是仅 20 年来关中平原粮食作物面积比重大幅下降,经济作物(果园,蔬菜)比重大幅增加,作物结构的变化所致。耕地 NDVI 增加的区域基本分布在黄土丘陵区 and 黄土残塬区,这主要与这些地区农业生产技术提高、作物品种改良、农药化肥使用增多因素使得粮食单产和复种指数提高有关<sup>[3,10]</sup>。草地、林地 NDVI 增加的主要原因是退耕还林还草、生态修复、生态移民等政策的实施,减轻了人类活动对自然植被的影响,林草植被得到恢复和改善所致。

## 4.2 结论

本文分析了泾河流域 2000—2021 年植被 NDVI 的时空变化特征,并结合同期气温、降水、人口、土地利用等数据,探讨了气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化趋势的影响,得出以下结论:

(1) 2000—2021 年,泾河流域植被 NDVI 呈显著增加趋势,全区平均增速为 0.059/10 a;

(2) 年际尺度上,气温和降水与 NDVI 总体呈正相关关系,气候变化有利于植被改善,且降水变化对植被 NDVI 的影响大于气温的影响;在月尺度上,NDVI 与 5 月和 7 月的降水变化呈正相关关系,与气温变化呈负相关关系。

(3) 人口密度变化与 NDVI 变化趋势呈负相关,

68.17%区域表现为人口密度减小 NDVI 增加的趋势,说明流域人口密度的减小有利于植被的恢复和改善。

(4) 土地利用类型内部变化是植被 NDVI 变化的主要原因;NDVI 显著减小区 NDVI 的减小趋势主要由关中平原耕地 NDVI 的减小引起,NDVI 显著增加区 NDVI 的增加趋势主要由草地、林地以及黄土丘陵区、黄土残塬区耕地 NDVI 的增加引起。

## 参考文献 (References):

- [1] 李登科,王钊.退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J].生态学杂志,2020,39(1):1-10.  
Li D K, Wang Z. Changes of fractional vegetation coverage after returning farmland to forests and its response to climate in Shaanxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1):1-10.
- [2] 徐光来,杨先成,徐晓华,等.气候变暖背景下安徽省月 NDVI 动态变化研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):397-406.  
Xu G L, Yang X C, Xu X H, et al. Dynamic changes of monthly NDVI in Anhui Province under background of climate warming[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(2):397-406.
- [3] 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.  
Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Effects of climate change and human activities on vegetation cover change in Loess Plateau[J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 2007, 37(11):1504-1514.
- [4] 周金霖,马明国,肖青,等.西南地区植被覆盖动态及其与气候因子的关系[J].遥感技术与应用,2017,32(5):966-972.  
Zhou J L, Ma M G, Xiao Q, et al. Vegetation dynamics and its relationship with climatic factors in southwestern China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(5):966-972.
- [5] 赵维清,李经纬,褚琳,等.近 10 年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力[J].生态学报,2019,39(20):7722-7736.  
Zhao W Q, Li J W, Chu L, et al. Analysis of spatial and temporal variations in vegetation index and its driving force in Hubei Province in the last 10 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20):7722-7736.
- [6] Tao G F, Jia K, Wei X Q, et al. Improving the spatio-temporal fusion accuracy of fractional vegetation cover in agricultural regions by combining vegetation growth models [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 101:102362.
- [7] 杨杰,张莹莹,王建雄,等.利用 NDVI 与 EVI 再合成的植被指数算法[J].遥感信息,2020,35(5):127-133.

- Yang J, Zhang Y Y, Wang J X, et al. Vegetation index algorithm using NDVI and EVI resynthesis[J]. *Remote Sensing Information*, 2020,35(5):127-133.
- [8] 刀剑,郑宏刚,王建雄.基于 NDVI 的云南省临沧市植被覆盖分析[J].*农业工程*,2019,9(8):50-55.  
Dao J, Zheng H G, Wang J X. Vegetation cover analysis of Lincang based on NDVI[J]. *Agricultural Engineering*, 2019,9(8):50-55.
- [9] Faour G, Mhawej M, Nasrallah A. Global trends analysis of the main vegetation types throughout the past four decades[J]. *Applied Geography*, 2018,97:184-195.
- [10] 孙晓鹏,王天明,寇晓军,等.黄土高原泾河流域长时序的归一化植被指数动态变化及其驱动因素分析[J].*植物生态学报*,2012,36(6):511-521.  
Sun X P, Wang T M, Kou X J, et al. Normalized difference vegetation index dynamic change and its driving factor analysis with long time series in the Jinghe River watershed on the Loess Plateau of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012,36(6):511-521.
- [11] 索安宁,巨天珍,熊友才,等.泾河流域土地利用区域分异与驱动力的关系[J].*中国水土保持科学*,2006,4(6):75-80.  
Suo A N, Ju T Z, Xiong Y C, et al. Relationship between land use space difference and driving factors in Jinghe River Basin[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006,4(6):75-80.
- [12] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(8):3907-3925.
- [13] 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* (中英文),2021,19(4):60-68.  
Li Y X, Zhu Q K, Shi R Y, et al. Spatial and temporal changes of vegetation cover and its influencing factors in the Loess Plateau from 2000 to 2018[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021,19(4):60-68.
- [14] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 2003,300(5625):1560-1563.
- [15] 陈效逖,喻蓉.1982—1999 年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化[J].*地理学报*,2007,62(1):41-51.  
Chen X Q, Yu R. Spatial and temporal variations of the vegetation growing season in warm-temperate Eastern China during 1982 to 1999[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007,62(1):41-51.
- [16] 李孟蔚,栾青,张宁,等.2000—2019 年吕梁市植被 NDVI 时空动态及其影响因素分析[J].*水土保持研究*,2022,29(4):248-254.  
Li M W, Luan Q, Zhang N, et al. Analysis of spatio-temporal dynamics and influencing factors of vegetation NDVI in Lüliang city from 2000 to 2019[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(4):248-254.
- [17] 刘旻霞,赵瑞东,邵鹏,等.近 15 a 黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析[J].*干旱区地理*,2018,41(1):99-108.  
Liu M X, Zhao R D, Shao P, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage and its driving forces in the Loess Plateau from 2001 to 2015[J]. *Arid Land Geography*, 2018,41(1):99-108.
- [18] 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.  
Yi L, Ren Z Y, Zhang C, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau[J]. *Resources Science*, 2014,36(1):166-174.
- [19] 李学梅,任志远,张翀.气候因子和人类活动对重庆市植被覆盖变化的影响分析[J].*地理科学*,2013,33(11):1390-1394.  
Li X M, Ren Z Y, Zhang C. Spatial-temporal variations of vegetation cover in Chongqing city(1999—2010): Impact of climate factors and human activities [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013,33(11):1390-1394.
- [20] 陈成,杨栋溟,王建雄,等.滇西南植被覆盖度动态变化特征及其驱动力分析[J].*水土保持研究*,2022,29(4):198-206.  
Chen C, Yang D H, Wang J X, et al. Analysis on dynamic change characteristics and driving forces of vegetation coverage in southwestern Yunnan[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(4):198-206.
- [21] 李薇,谈明洪.西南山区人口空间重组及其对植被的影响:以河流沿线为例[J].*生态学报*,2018,38(24):8879-8887.  
Li W, Tan M H. Spatial redistribution of populations in mountainous areas and its impact on vegetation change in southwest China: a riverside case study[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(24):8879-8887.
- [22] Cai H Y, Yang X H, Wang K J, et al. Is forest restoration in the southwest China Karst promoted mainly by climate change or human-induced factors[J]. *Remote Sensing*, 2014,6(10):9895-9910.
- [23] Li W, Li X B, Tan M H, et al. Influences of population pressure change on vegetation greenness in China's mountainous areas[J]. *Ecology and Evolution*, 2017,7(21):9041-9053.
- [23] Li W, Li X B, Tan M H, et al. Influences of population pressure change on vegetation greenness in China's mountainous areas[J]. *Ecology and Evolution*, 2017,7(21):9041-9053.