

# 2000—2019 年吕梁市植被 NDVI 时空动态及其影响因素分析

李孟蔚<sup>1</sup>, 栾青<sup>1</sup>, 张宁<sup>2</sup>, 常清<sup>3</sup>, 樊子菡<sup>4</sup>, 杨倩<sup>1</sup>, 赵永强<sup>1</sup>, 米晓楠<sup>1</sup>

(1.山西省气候中心, 太原 030006; 2.山西省气象信息中心, 太原 030006;

3.山西省气象服务中心, 太原 030002; 4.山西省林业和草原工程总站, 太原 030001)

**摘要:**为了详细分析吕梁市植被生长变化与气候变化和人类活动的关系,基于吕梁市的 2000—2019 年逐年归一化植被指数(NDVI)数据和 13 个县(市、区)气象观测站年气温和降水观测数据,采用空间插值方法、空间相关性分析法和残差分析法,对吕梁市多年植被 NDVI 的时空变化特征进行分析,并探讨了气候变化和人类活动对吕梁市植被覆盖变化的影响。结果显示:2000—2019 年吕梁市 96.32% 的区域 NDVI 呈现增加趋势,但各区域间存在明显空间性差异,中部吕梁山山区 NDVI 较高,东部平川地带和西部沿黄区域 NDVI 较小。总体而言,2000—2019 年吕梁市的 NDVI 呈波动增加趋势,2018 年达最大值。2000—2019 年吕梁市 NDVI 与降水量和气温在年尺度上均呈正相关关系,且植被生长发育受降水的影响强于气温,全市 38% 的区域植被 NDVI 与气温-降水的复相关性通过 0.05 显著水平检验;人类活动对吕梁市 95% 以上地区的植被生长有积极影响,表明退耕还林还草等生态修复工程对吕梁市植被覆盖增加有积极作用,生态提升效应逐渐凸显。

**关键词:**吕梁市; 植被覆盖; 残差分析; 人类活动

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0248-07

## Analysis of Spatiotemporal Dynamics and Influencing Factors of Vegetation NDVI in Lüliang City from 2000 to 2019

LI Mengwei<sup>1</sup>, LUAN Qing<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>2</sup>, CHANG Qing<sup>3</sup>,  
FAN Zihan<sup>4</sup>, YANG Qian<sup>1</sup>, ZHAO Yongqiang<sup>1</sup>, MI Xiaonan<sup>1</sup>

(1.*Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006, China*; 2.*Shanxi Meteorological Information Center, Taiyuan 030006, China*; 3.*Shanxi Meteorological Service Center, Taiyuan 030002, China*; 4.*Shanxi Forestry and Grassland Engineering Station, Taiyuan 030001, China*)

**Abstract:** Based on the method of spatial interpolation, spatial correlation analysis and residual analysis, the annual normalized difference vegetation index (NDVI), annual temperature and precipitation meteorological observation data at 13 meteorological observation stations from 2000 to 2019 were selected to analyze the spatiotemporal variation characteristics of vegetation NDVI and the impact of climate change and human activities. NDVI showed a fluctuating increase trend from 2000 to 2019 in 96.32% of Lüliang City. However, there were obvious spatial differences in Lüliang City. NDVI was higher in the Lüliang Mountain, and lower in the eastern plain area and along the western Yellow River area. As a whole, NDVI in Lüliang City showed a fluctuating increase trend, with the maximum in 2018. Spatial correlation analysis showed that NDVI was positively correlated with both annual precipitation and temperature in the whole of regions, which was significantly correlated ( $p < 0.05$ ) in 38% of Lüliang City. As for precipitation, the influence was stronger than temperature. Residual analysis shows that human activities influenced positively the vegetation coverage change in more than 95% of Lüliang City. Therefore, returning farmland to forestland and grassland projects have boosted increase of vegetation coverage in Lüliang City.

收稿日期:2021-05-27

修回日期:2021-06-24

资助项目:中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J067);山西省气象局青年资助项目(SXKQNQH20217147)

第一作者:李孟蔚(1990—),女,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向农业气象和卫星遥感。E-mail:lmw0706@163.com

通信作者:栾青(1979—),男,山西阳泉人,高级工程师,主要从事农业生态气象卫星遥感研究。E-mail:luanqing2003@163.com

**Keywords:** Luliang City; vegetation coverage; residual analysis; human activities

在地球生态系统中,某一区域植被的生长变化可以反映出该地区地气系统收支平衡和生态环境变化的情况,揭示区域生态环境和人类活动的相互影响以及相互反馈作用<sup>[1]</sup>。随着人与自然的和谐发展,研究植被变化与气候因子、人类活动的需求越来越迫切,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)广泛应用于评价植被生长发育和环境生态变化等方面。在遥感图像中,NDVI 定义为近红外波段和红光波段反射率的差与其两者之和的比值,也是了解植被覆盖情况、地球生态系统水汽能量收支过程,阐明人类活动和环境之间关系的一种重要表现因子<sup>[2-6]</sup>。环境因子包括植被生长发育所必需的气温、降水等气候因子,对植被的生长发育有着重要的影响<sup>[7-10]</sup>,同时人类活动也影响着植被生长变化。对气候因子、人类活动和植被生态环境变化关系分析时,归一化植被指数数据集成为其研究主要的数据来源。

吕梁山区是黄河中游重要的生态涵养区,山西省重要的生态屏障区,因其地处黄土高原,生态环境脆弱,受气候因子和人类活动的双重影响植被覆盖相对较低,加重了水土流失。据统计,吕梁市 25 度以上陡坡地占全市耕地面积的 1/3,全市水土流失面积达 1.47 万 km<sup>2</sup>,占全市总面积的七成以上,所以提高植被覆盖度、改善植被生长状况是该地区生态恢复的关键措施<sup>[11-12]</sup>。研究植被覆盖变化状况及其与气候因子变化和人类活动的关系,对进一步加强吕梁山区生态环境恢复具有重要现实意义。国内许多学者对吕梁山、黄土高原、黄河流域沿岸植被变化开展了大量的研究,结果表明,吕梁山区植被覆盖状况总体呈改善趋势<sup>[13-14]</sup>。刘绿柳等<sup>[15]</sup>认为多年平均降水对黄土高原东部植被、黄河上游植被改善的促进作用最大;徐茜<sup>[11]</sup>、范倩倩<sup>[12]</sup>、康悦<sup>[16]</sup>、何航<sup>[17]</sup>等的研究显示太行山区黄土高原北部 NDVI 呈显著增加趋势,NDVI 与气温、降水整体呈现正相关关系。植被长势的时空分布动态不仅与气候变化息息相关,而且与人类经济活动有着密切联系<sup>[18-24]</sup>,2000 年以来,吕梁市开展了大规模的退耕还林还草等生态建设修复活动,植被生态状况得到了明显改善<sup>[25]</sup>。

目前,关于吕梁市植被变化的研究,大多学者采用植被指数的变化来反映,但大部分所涉及区域仅为黄土高原的局部地区,且时间序列长短不一,不能很好地说明吕梁市植被生态的整体变化情况,未能定量给出气候因子和人类活动对植被恢复的作用。为此,本文利用 2000—2019 年吕梁市年均 NDVI 数据对其植被生态进

行时空分布特征分析,并较详细探究主要气候因子(气温、降水)与 NDVI 的相关性,评估吕梁市植被生长变化情况及其与气候变化的关系,进一步剥离气候因子(气温、降水)对植被长势变化的影响后,讨论人类活动过程对吕梁市植被生长变化的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

吕梁市(36.72°—38.72°N, 110.37°—112.32°E)地处黄河流域山西段中部(图 1),平均海拔约为 1 200 m,总面积 2.1 万 km<sup>2</sup>,地势呈东西低,中部高的特点。吕梁市属温带大陆性季风气候,具有四季分明,雨热同步、光照充足的特征。年平均气温 7~12℃,年降水量 380~650 mm,年际变化较大,主要集中在 7—9 月。植被类型主要从南到北以暖温带栎类杨桦阔叶杂木林逐步过渡到华北落叶松和油松为主的针叶混交林。吕梁市为黄河中游重要的生态涵养区,是山西省重要的生态屏障区,生态区位优势明显,植被改善对吕梁市的全面发展发挥着重要的生态服务和保障作用。

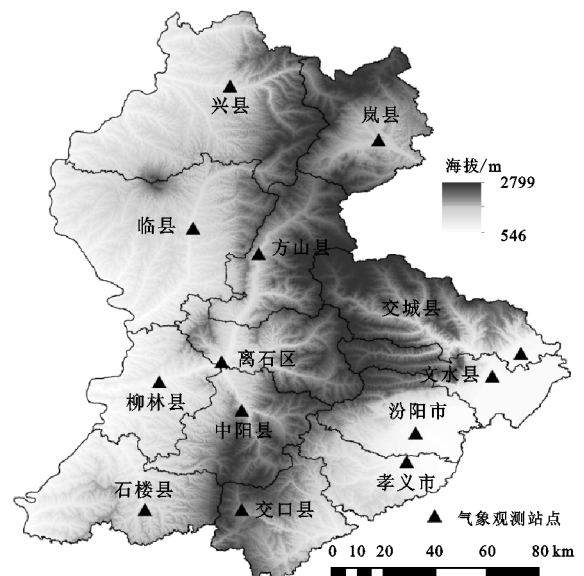


图 1 研究区域及地面气象观测站点分布

### 1.2 数据来源

NDVI 数据来源于美国航空航天局(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),主要为 2000—2019 年月合成的植被指数产品(MOD13A3),空间分辨率为 1 km,在 ENVI 遥感图像处理软件中利用最大值合成法生成年 NDVI 数据集。气象资料包括研究区内 13 个气象站点 2000—2019 年的逐日气温与逐日降水量,来源于山西省气象信息中心,并用克里金插值到与 NDVI 相同的空间分辨率。

### 1.3 研究方法

本文采用 ENVI 5.3 遥感图像处理系统对 MOD13A3 数据进行区域裁剪、数据合成及趋势分析等处理,利用 ArcGIS 10.5 地理信息系统软件制图。

**1.3.1 趋势分析** slope 是某时间段内,变量年际变化最小次方的线性回归方程的斜率。反映了变量上升或下降的速率,即表示上升或下降的倾向程度。

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

式中:slope 为多年 NDVI 的线性倾向值; $i$  为年序号( $i=1$  表示 2000 年, $i=2$  表示 2001 年, $\dots$ ); $x_i$  为第  $i$  年的 NDVI 值; $n$  为时间序列长度。

**1.3.2 相关分析** 相关分析用于揭示不同因素之间相互关系的密切程度,简单的相关分析是对两个因素之间相关程度的度量,用相关系数(Pearson 相关系数)来表征。但本文分析的植被生长与气温和降水都有关系,因此,为准确分析 NDVI 与气温以及 NDVI 与降水的相关性,采用偏相关分析法,消除第 3 个因素的影响,得出两个因素之间的相关性。基于像元相关性分析法分别计算 NDVI 与气温和降水的偏相关系数,显著性检验采用 T 检验法分析。研究某一个因素与几个因素之间的相关关系采用复相关分析法,基于像元相关性分析计算植被 NDVI 与气温-降水之间的复相关系数,显著性检验采用 F 检验法。

**1.3.3 残差分析** 假设只有 2 个气候因子(气温和降水)对植被生长变化有影响,利用 2000—2019 年 NDVI 和气温、降水的关系建立线性回归方程,得出  $\text{NDVI}_b$  (表示只受气温、降水影响下的植被变化):

$$\text{NDVI}_b = a + k_1 x_1 + k_2 x_2 + \epsilon \quad (2)$$

式中: $\epsilon$  为随机误差; $a$  为常数; $x_1$  为年降水量(mm); $x_2$  为年均气温( $^{\circ}\text{C}$ ); $k_1, k_2$  为 NDVI 与降水、气温的回归系数。

基于上述预测值  $\text{NDVI}_b$ ,通过残差法从实际值  $\text{NDVI}_a$  中分离出人类活动对植被生长变化的影响,从而定量研究人类活动贡献率。公式如下:

$$\sigma = \text{NDVI}_a - \text{NDVI}_b \quad (3)$$

$\sigma < 0$  表示人类活动对植被有消极影响; $\sigma > 0$  表示人类活动对植被有积极影响;将残差序列做趋势分析<sup>[26]</sup>,探究 2000—2019 年人类活动对吕梁市植被生长变化的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 NDVI 的变化趋势

通过对吕梁市多年年平均 NDVI 进行统计分析

可知,2000—2019 年吕梁市年均 NDVI 变化范围介于 0.30~0.417,平均值为 0.37,最大值出现在 2018 年,超过平均值 12.7%,最小值出现在 2000 年为 0.30,低于平均值 18.9%。2000—2019 年吕梁市年均 NDVI 呈现波动增加趋势,趋势倾向率为 0.005 6/a,2018 年达到最大值后在高位波动(图 2)。

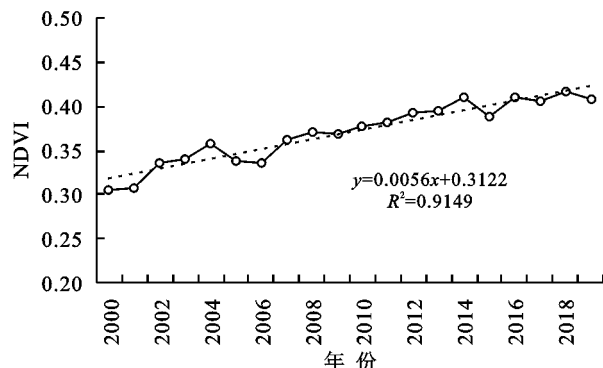


图 2 2000—2019 年吕梁市年平均 NDVI 变化

从 2000—2019 年区域植被 NDVI 变化趋势分级统计结果可以看出,近 20 a 来,区域植被改善面积( $\text{slope} > 0$ )为 20 789.46  $\text{km}^2$ ,占总面积的 96.32%,植被退化面积( $\text{slope} < 0$ )为 794.61  $\text{km}^2$ ,占总面积的 3.68%,表明 2000—2019 年吕梁市大部分地区植被生长状况得到改善。尽管吕梁市 2000—2019 年近 20 a 的 NDVI 在整体上呈显著增加趋势,但各区域之间具有较强的空间差异性规律(图 3)。整体来看,中部吕梁山区 NDVI 高,吕梁山脉东西两侧 NDVI 低。在吕梁市大部分地区,NDVI 的变化趋势呈明显的上升趋势(图 4),说明近 20 a 来吕梁市的植被情况得到较好改善。吕梁山脉西部沿黄地区植被生存条件比较恶劣,土地沙漠化严重,导致该区域植被覆盖较低。经济发展相对较快的吕梁山脉东南部盆地地区,如交城、文水、汾阳、孝义等环省城太原周边县(市),NDVI 呈减少趋势。NDVI 的减少显然与快速的城镇化发展过程、省城工矿企业外迁有着密切的关联。吕梁山脉等地 NDVI 呈现增加趋势,生态环境得到显著改善。

### 2.2 2000—2019 年 NDVI 与气候因子的关系

逐像元计算 2000—2019 年吕梁市植被 NDVI 与降水、气温之间的偏相关系数,结果显示植被 NDVI 对气候因素的响应具有明显的空间差异性。NDVI 与年平均气温的偏相关系数介于 -0.73~0.73(图 5A),通过  $p < 0.05$  的显著性检验的区域仅占 4%,呈正相关区域占总面积的 73%,主要集中分布在吕梁市中部的吕梁山区;呈负相关的面积占总面积的 27%,主要分布在吕梁市各市县城市周边区域。植被 NDVI 与年降水的偏相关系数介于 -0.60~0.79(图 5B),植被 NDVI 与年降水呈正、负相关的面积分别



占总面积的 96%和 4%;通过  $p<0.05$  的显著性检验的区域占 55%,主要分布在吕梁市西部沿黄地区,其中通过  $p<0.01$  检验的区域面积占 21%,主要分布在兴县南部和临县的大部分地区。可见,吕梁市植被变化受降水影响大于气温。

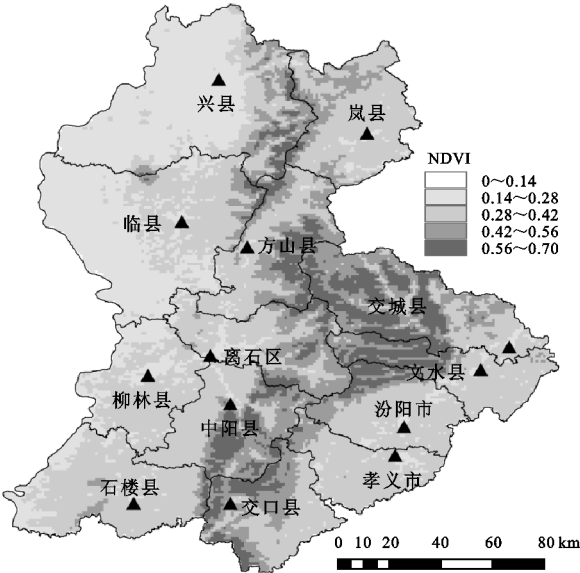


图 3 2000—2019 年吕梁市多年平均 NDVI 空间分布

由 NDVI 与气温-降水的复相关系数空间分布(图 6A)得出,复相关系数介于 0~0.5,复相关性经 F 显著性检验呈显著( $p<0.05$ )的区域占总面积的 38%,8%的区域相关性极显著( $p<0.01$ ),主要集中在吕梁市西北部沿黄地区(图 6B)。

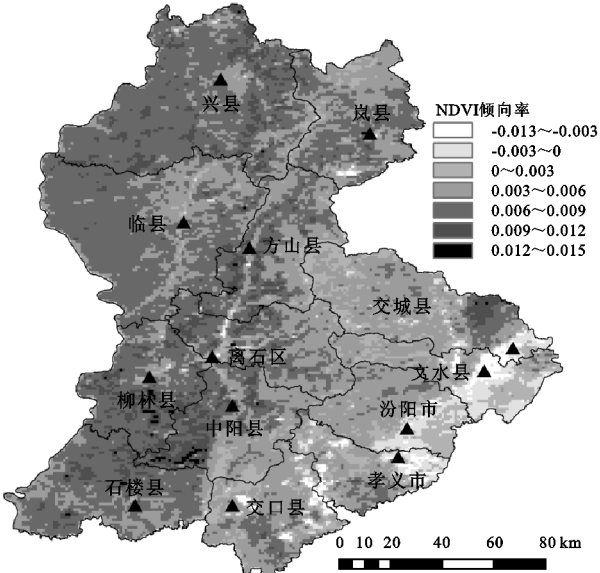


图 4 2000—2019 年平均 NDVI 变化趋势

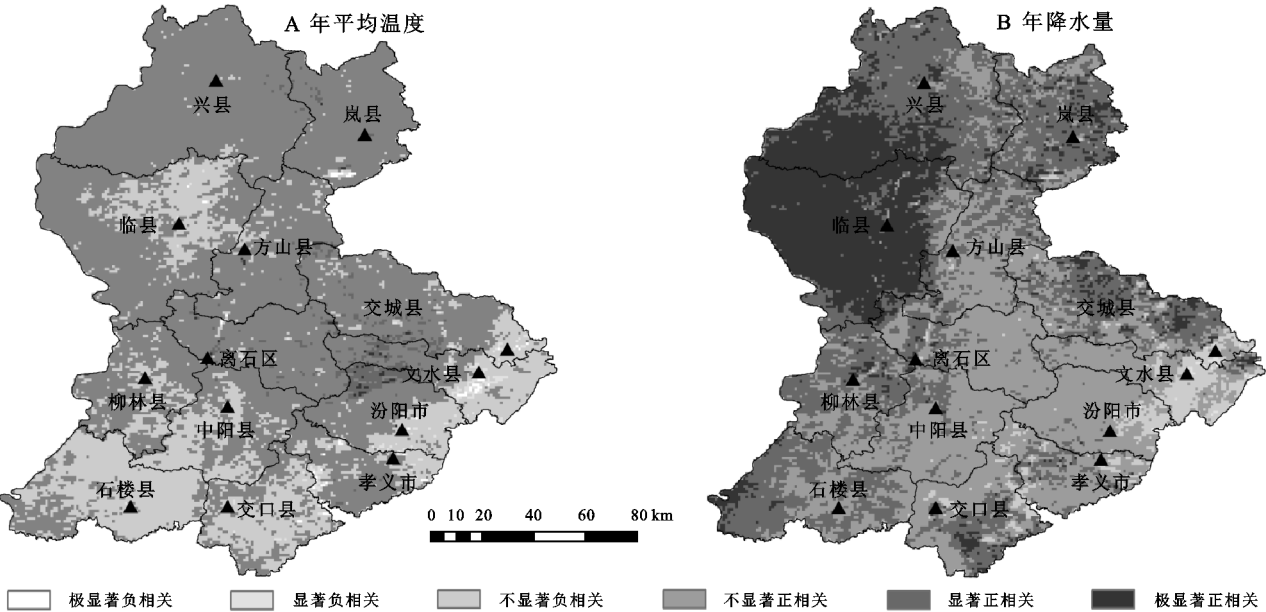


图 5 2000—2019 年 NDVI 与年平均温度、年降水量相关性的空间分布

2.3 人类活动对植被覆盖变化的影响

2000 年以来,吕梁市大部分地区人类活动对植被覆盖的影响强度有逐渐增强的趋势,人类活动对植被覆盖影响主要存在两个方面:(1) 对植被 NDVI 的增加人类活动起到促进的作用,即人类活动的积极影响;(2) 对植被 NDVI 人类活动起到抑制的作用,即人类活动的消极影响。

2000—2019 年人为因素对植被变化的影响趋势表明,人类活动对植被变化响应的空间分布特征与

NDVI 的多年变化趋势一致。NDVI 的变化除了响应气候因子的变化外,一定程度上也反映出人类活动的影响。吕梁市 95%区域人类活动表现出积极影响效应(图 7),NDVI 残差显著增加(人类活动积极影响)的区域,植被的生长发育状况不能只用降水、气温等气候因子的变化来解释,人类活动过程在其中产生很大作用。

通过文献查阅、新闻报道等选取吕梁市各县(市、区)植树造林点 25 个,提取各造林点 2000—2019 年

NDVI 倾向率(图 8),结果显示:因吕梁市东部的交城县、文水县、汾阳市、孝义市和交口县植树造林面积相对较小,植树造林点 NDVI 倾向率较小,最小值为 0.005;吕梁市中西部其余县(市、区)植树造林面积大,植树造林点 NDVI 倾向率较高,最小值为 0.007。因此,将吕梁市东部县(市、区,交城县、文水县、汾阳市、孝义市和交口县)NDVI 倾向率大于 0.005 的区域表示为该区域植树造林区,将吕梁市中西部的其余县(市、区)NDVI 倾向率大于 0.007 的区域表示为中西部植树造林区。进一步统计各县(市、区)植树造林

区域面积,并与 2000—2019 年造林实际累积面积进行对比分析(表 1),结果显示:基于 NDVI 倾向率提取的吕梁市东部县(市、区)植树造林区域面积与实际造林面积误差相对较大,其中文水县误差最大,相对误差为-65.77%;中西部各县(市、区)基于 NDVI 倾向率提取的植树造林面积与实际造林面积的误差均较小,相对误差绝对值均小于 10%。综合上述指标,绘制吕梁市累积造林面积空间分布图(图 9),可见造林区域主要分布在西部沿黄地区和中部吕梁山区,其中兴县和临县 2000—2019 年累积造林面积大于 920 km<sup>2</sup>。

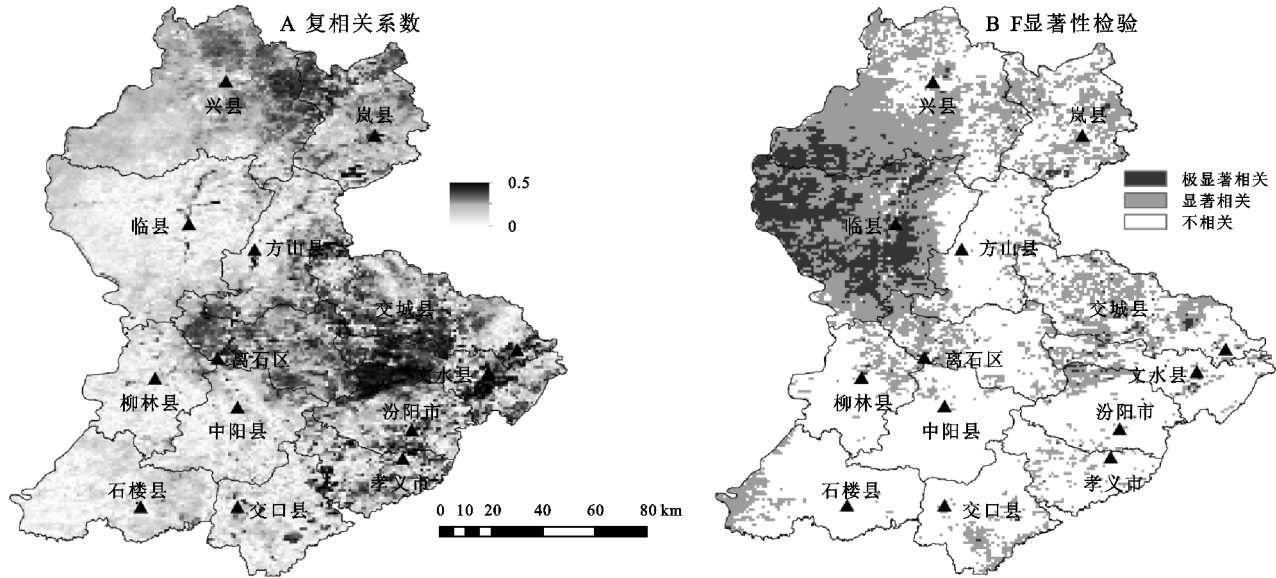


图 6 2000—2019 年植被 NDVI 与气温-降水的复相关系数及其 F 显著性检验结果空间分布

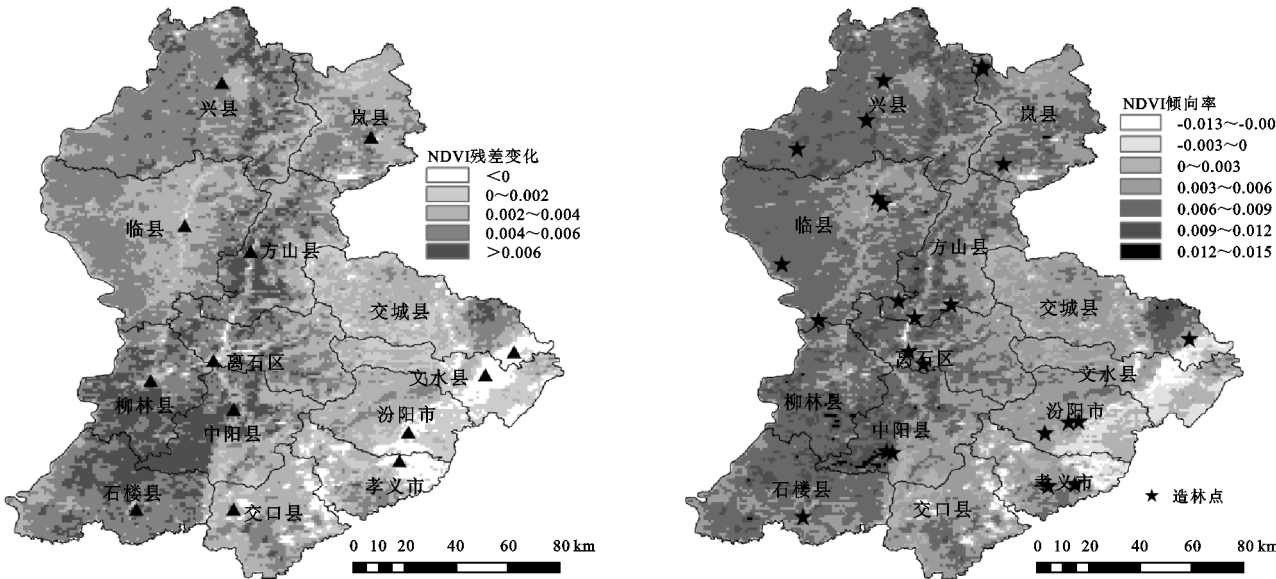


图 7 2000—2019 年人类活动对植被变化影响的空间分布

通过对吕梁市各县(市、区)的每年累积造林面积与植被 NDVI 之间的相关分析(表 1),吕梁市各县(市、区)逐年累积造林面积与植被 NDVI 之间具有极显著的相关关系( $p<0.01$ ),说明生态建设工程在吕梁市植被覆盖增加中发挥了主要作用。

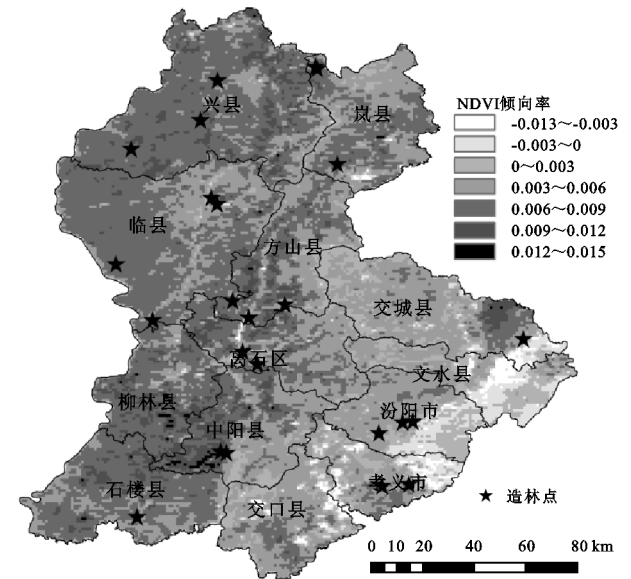


图 8 吕梁市造林点空间分布

3 讨论

吕梁市植被 NDVI 增加的主要气候因素是降水,主要人为原因是退耕还林还草等一系列生态建设工程的实施,这与于璐<sup>[26]</sup>、夏露<sup>[27]</sup>、刘咏梅<sup>[28]</sup>等的研

究结论一致。吕梁市各个区域不同植被类型并不是都与气候因子(气温、降水)呈显著相关性。植被生长不仅受到气温、降水等气象条件的影响,同时还与该地区土壤结构状况、土地类型和当地政策等方面紧密相关,植被的生长发育是受到多种因素共同作用的结果。本文仅对气温和降水气候因素进行相关分析,使用残差法探究气候因素和人类活动对吕梁市植被变化的影响,而未分析气候因子对植被生长发育的滞后性影响,其计算结果存在不确定性,有待进一步研究。

表1 吕梁市2000—2019年累积造林面积、提取造林面积对比和年均NDVI与累积造林面积的相关系数统计

地区	2000—2019 年累积造林 面积/km <sup>2</sup>	提取造林 面积/km <sup>2</sup>	相对 误差/%	年均NDVI与 累积造林面积的 相关系数
兴县	1045.04	986.4	-5.61	0.89**
岚县	548.15	558.9	1.96	0.93**
临县	1145.37	1103.4	-3.66	0.90**
方山县	611.46	591.3	-3.30	0.97**
柳林县	499.8	542.7	8.58	0.85**
离石区	463.14	445.5	-3.81	0.95**
交城县	396.51	530.1	33.69	0.92**
中阳县	479.91	495.9	3.33	0.93**
文水县	241.9	82.8	-65.77	0.41**
汾阳市	261.8	233.1	-10.96	0.61**
孝义市	331.11	243	-26.61	0.38**
石楼县	581.2	604.8	4.06	0.65**
交口县	373.7	387.9	3.80	0.48**
吕梁市	6979.09	6805.8	-2.48	0.93**

注:\*表示相关系数通过 $p=0.05$ 显著性检验,\*\*表示相关系数通过 $p=0.01$ 显著性检验。

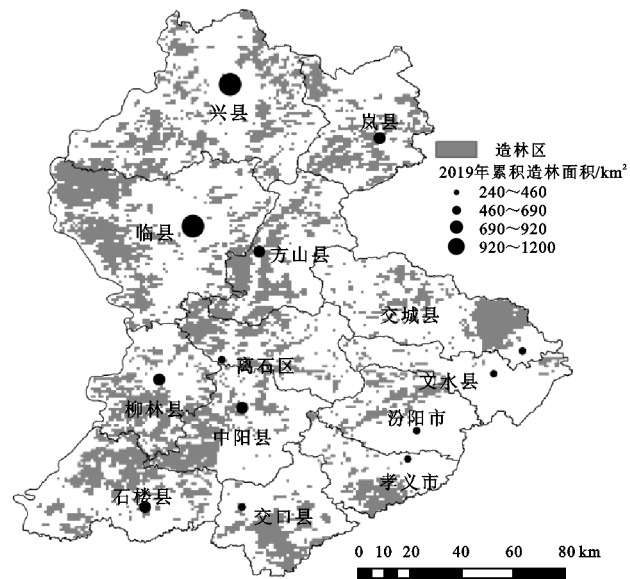


图9 吕梁市2000—2019年实际累积造林面积和提取造林面积的空间分布

2000年以来,吕梁市实施退耕还林还草等生态修复工程,促进了吕梁市植被恢复,吕梁市NDVI也显著增加,生态修复工程逐渐突出其生态效应。但是,经济发展迅速的区域人类活动对植被NDVI的增长产生消极影响,如吕梁山脉东南部盆地区域[交城县、文水县、汾阳市、孝义市、交口县等环省城太原周边县(市)],这些地区经济快速发展,城市周边的农田被占用变为工业建设用地来支持城镇化扩张运动,导致经济相对发达城市的周边区域植被NDVI显著减少。基于NDVI倾向率统计的吕梁市东部县(市、区)植树造林区域面积与实际造林面积误差相对较大,可能与造林受气候影响的成活率有关,与实际造林面积的抽样调查的统计误差有关,也可能与该区域快速发展的城镇化进程有关,因此,要详细给出确切的植树造林区域需进一步利用较高空间分辨率卫星资料进行解译。随着生态建设工程效益的充分体现,吕梁市NDVI趋于一定高点,东南部平原地区工业化城镇化发展对生态环境的压力越来越大。未来如何缓解NDVI的下降趋势,密切关注NDVI稳定性差的区域,巩固退耕还林成果,是吕梁市生态保护建设仍需关注的重要问题。

## 4 结论

(1) 2000—2019年吕梁市NDVI呈现波动增加趋势,2018年达到最大值后在高位波动。吕梁市植被高覆盖地区主要分布在吕梁山山区。吕梁市NDVI增加区域面积占总面积的96.32%,减少的区域仅占3.68%。

(2) 2000—2019年吕梁市NDVI与年降水量、年平均气温相关系数均呈正相关。NDVI与气温呈正相关的面积占总面积的73%;呈负相关的面积占27%;NDVI与降水量呈正、负相关面积分别占总面积的96%,4%。NDVI与降水量的偏相关性略高于其与年平均气温的偏相关性,植被生长受降水的影响强于气温。吕梁市38%以上区域植被NDVI与气温-降水复相关性通过0.05显著水平检验。

(3) 除了气候因素对吕梁市植被NDVI的作用外,人类活动对其95%区域植被生长变化产生积极的影响,其中退耕还林还草等生态修复工程是吕梁市植被增加主要的人类积极影响活动。

### 参考文献:

[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.



- [2] Piao S, Wang X, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [3] Wang G X, Liu G S, Li C J, et al. The variability of soil thermal and hydrological dynamics with vegetation cover in a permafrost region[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 162: 44-57.
- [4] Jiang M, Tian S, Zheng Z, et al. Human activity influences on vegetation cover changes in Beijing, China, from 2000 to 2015[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 271-289.
- [5] Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981—2006): Impacts of climate changes and human activities [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(1): 67-78.
- [6] 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.
- [7] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [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] 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.
- [10] 谢胜金, 刘永和, 姚风欣. 1998—2015年北京市 NDVI 时空变化及其与气候因子的响应关系[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(3): 340-347.
- [11] 徐茜, 任志远, 杨忍, 等. 黄土高原地区归一化植被指数时空动态变化及其与气候因子的关系[J]. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(1): 82-87.
- [12] 范倩倩, 赵安周, 王金杰, 等. 1982—2015年黄土高原 NDVI 时空演变及其对气候变化的季节响应[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(5): 1664-1675.
- [13] Gong D Y, Shi P J. Northern hemispheric NDVI variations associated with large-scale climate indices in spring[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(12): 2559-2566.
- [14] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 420-427.
- [15] 刘绿柳, 肖风劲. 黄河流域植被 NDVI 与温度、降水关系的时空变化[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 477-481.
- [16] 康悦, 李振朝, 田辉, 等. 黄河源区植被变化趋势及其对气候变化的响应过程研究[J]. *气候与环境研究*, 2011, 16(4): 505-512.
- [17] 何航, 张勃, 侯启, 等. 1982—2015年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 70-80.
- [18] Liu F, Yan H M, Gu F X, et al. Net primary productivity increased on the Loess Plateau following implementation of the grain to green program[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(4): 413-421.
- [19] 张翀, 王静, 雷田旺, 等. 退耕还林工程以来黄土高原植被覆盖与地表湿润状况时空演变[J]. *干旱区研究*, 2017, 35(6): 1468-1476.
- [20] 韩炳宏, 周秉荣, 颜玉倩, 等. 2000—2018年青藏高原植被覆盖变化及其与气候因素的关系分析[J]. *草地学报*, 2019, 27(6): 1651-1658.
- [21] Liu D, Chen Y, Cai W, et al. The contribution of China's Grain to Green Program to carbon sequestration [J]. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1675-1688.
- [22] 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.
- [23] 孙应龙, 钱拴, 延昊, 等. 2000—2018年云南省典型矿区植被生态时空变化特征: 以临沧市为例[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(12): 2381-2389.
- [24] 崔利芳, 王伦澈, 屈赛, 等. 气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响[J]. *地球科学*, 2020, 45(6): 1905-1917.
- [25] 范泽孟, 李婧, 岳天祥. 黄土高原生态系统过渡带土地覆盖的时空变化分析[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(3): 426-436.
- [26] 于璐, 武志涛, 杜自强, 等. 气候变化背景下京津风沙源区人类活动对植被影响的量化分析[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2007-2014.
- [27] 夏露, 刘咏梅, 柯长青. 基于 SPOT4 数据的黄土高原植被动态变化研究[J]. *遥感技术与应用*, 2008, 23(1): 67-71.
- [28] 刘咏梅, 李京忠, 夏露. 黄土高原植被覆盖变化动态分析[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2011, 41(6): 1054-1058.