

DOI: 10.5846/stxb201906291372

殷崎栋, 柳彩霞, 田野. 基于 MODIS NDVI 数据的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响. 生态学报, 2021, 41(4): 1571-1582.

Yin Q D, Liu C X, Tian Y. Spatio-temporal greenness and anthropogenic analysis in Shaanxi based on MODIS NDVI from 2001 to 2018. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1571-1582.

基于 MODIS NDVI 数据的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响

殷崎栋¹, 柳彩霞^{2,*}, 田野³

1 陕西生态环境规划设计院有限公司, 西安 710075

2 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

摘要: 气候和人类活动是控制和影响植被空间分布及其变化的基本驱动力。利用 2001—2018 年的 MODIS NDVI 和 1999—2018 年的降雨时间序列数据, 分析了陕西省 NDVI 的时空变化规律。采用 TSS-RESTREND (Time Series Segmentation and Residual Trend) 算法剥离了气候要素(降雨)对植被 NDVI 的影响, 分析了人类活动对植被变化的影响程度和区域。(1) 2001—2018 年间, 陕西省 NDVI 呈显著增加, 全省平均增加速率为 0.006/a; (2) 相比 18 年来的平均值, 77.29% 的区域大于均值。其中, 陕北的榆林市、延安市大于均值的区域较大, 分别为 97.52% 和 89.03%, 秦巴山区次之, 为 73.91%。2012 年之后, NDVI 高值向北逐年推进趋势明显。(3) 全省 NDVI 增加的区域达 71.77%, 而陕北地区的增加量明显大于关中平原区和陕南秦巴山地, 其中陕北的榆林 NDVI 增加区域为 72.11%, 延安为 86.44%, 均超过了全省平均水平。(4) 总体上陕西全省呈变绿趋势。榆林市和延安市的变绿区域明显多于关中平原和秦巴山地, 延安和榆林的剧烈增长区域分别为 55.46% 和 34.34%, 而陕南为 41.03%, 说明处于湿润气候区的陕南地区也有显著变绿趋势。

关键词: NDVI; 人类活动; RESTREND; TSS-RESTREND; 退耕还林工程; 变化趋势

Spatio-temporal greenness and anthropogenic analysis in Shaanxi based on MODIS NDVI from 2001 to 2018

YIN Qidong¹, LIU Caixia^{2,*}, TIAN Ye³

1 Shaanxi Eco-environmental Planning and Design Institute Ltd., Xi'an 710075, China

2 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

Abstract: Remotely sensed data provide the only long term, large scale record of vegetation changes in natural terrestrial ecosystems. Changes in the spatiotemporal pattern of vegetation alter the structure and function of landscapes, consequently affecting biodiversity and ecological processes. Climate and human activities are the basic drivers to control the spatial distribution and change of vegetation. Disentangling human-induced vegetation changes from those driven by climate variations is critically important for ecological understanding and management of landscapes. The main objective of this study was to detect spatial distribution of human-induced vegetation changes. The Residual Trend, or RESTREND, method is applied to satellite observations to detect vegetation changes. Based on the rainfall and the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) time series from 2001 to 2018, we analyzed

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0501101, 2016YFC0503603)

收稿日期: 2020-06-29; 网络出版日期: 2020-12-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liucx@radi.ac.cn

the temporal and spatial variation of NDVI in Shaanxi Province, China. The influence of climate factors, rainfall, was separated by Time Series Segmentation and Residual Trend (TSS-RESTREND) algorithm and we got the areas and magnitude of human activities on vegetation change. The results showed that (1) during 2001—2018, the NDVI value in Shaanxi had significantly increased and the average increase rate was 0.006/a. (2) Compared with the average NDVI value of the 18 years, 77.29% of the areas were greater than the mean value. Yulin and Yanan in northern Shaanxi had the greatest areas with 97.52% and 89.03% respectively, followed by Qinba Mountain Area (73.91%). After 2012, the high value of NDVI tended to be northward year by year. (3) Human activities had a great influence on vegetation change and the total increase areas of NDVI by human activities was 71.77%, while the increase in northern Shaanxi was significantly larger than that in Guanzhong Plain and Qinba Mountain area. The increase area of NDVI in Yulin and Yanan were 72.11% and 86.44%, respectively, which exceeded the average level of the whole province. (4) Based on the rules of greenness level, the changes of NDVI in the province were qualitatively divided into increase (INC, I1, I2 and I3), decrease (D1, D2 and D3), and no obvious change (NSC). The greenness levels in Yulin City and Yanan City were higher than those in Guanzhong Plain and Qinba Mountain area. The sharp greenness growth areas of Yanan and Yulin are account for 55.46% and 34.34%, respectively, while those in southern Shaanxi are 41.03%, indicating that the southern Shaanxi area with humid climate also had a significant greening trend.

Key Words: NDVI; human activities; RESTREND; TSS-RESTREND; Grain for Green Program; change trend

陆地植被是大气、岩石圈、土壤圈、水圈和生物圈相互作用的产物。它是连接气候变化、人类活动和生态系统的一个重要环节。气候和人类活动是控制和影响植被空间分布及其变化的基本驱动力^[1-2], 辨别气候和人类活动影响区域对于理解和管理地表植被非常重要, 特别是在干旱和半干旱地区, 因为在这些地区, 年降雨量相对较低, 年降雨量波动性较大。在辨识人类活动造成的影响程度时, 气候的变异性很难将植被中的自然变化与直接人类活动引起的自然变化分开^[3-6]。鉴于土地退化或者绿化工程可能在几十年内逐步发生, 对植被的观测时间序列必须一致, 因此遥感技术成为监测并分析植被变化的一项可靠技术。遥感观测的植被指数, 由于具备统一的观测基准和长时间序列特征, 可以定量描述植被覆盖和植被生产力的变化。利用归一化差异植被指数(NDVI)和气候因子的关系, 可以研究人为和自然因素引起的植被变化^[6-8]。RESTREND 算法是一种从 NDVI 趋势中消除气候影响的方法^[9], 基于气候数据和植被指数进行土地退化的检测^[3, 9]。早期的 RESTREND 算法通过计算年最大 NDVI、生态系统生产力和降水之间的线性回归来控制影响植被的气候要素的变化^[4, 9], 然后从线性回归关系中预测的 NDVI 与观测 NDVI 之间的差异, 得到 NDVI 残差, 之后对残差进行线性趋势分析, 该分析结果被认为是人类活动引起的地表植被变化。然而, 由于降水量和植被指数之间的线性关系存在不稳定性。当在时间序列的中间发生退化时, 这种线性关系可能会发生改变, 导致不可靠的结果^[5]。因此, 检测植被变化是否引起植被与降水之间的线性关系(也称为断点)至关重要。遥感产品在时间序列上的断点检测已应用于土地覆盖制图^[10-12]和森林管理^[13-14]。已有研究表明, 当在植被与降水之间的关系中断时检测断点时, 可以改善植被变化检测精度^[3, 5, 15]。时间序列分割和残差趋势分析(Time Series Segmentation and Residual Trend, TSS-RESTREND)是由 Burrell, Evans^[6]提出, 加入了断点检测的 RESTREND 算法, 成功用于检测澳大利亚全国的植被变化情况^[6, 8], 能够改进对变化区域和变化方向的检测。

陕西省地处中国大陆腹地, 是水土流失、沙化等环境问题最严峻的地区之一。自 1999 年起, 陕西省相继启动并实施了生态环境建设综合治理工程、天然林资源保护工程、退耕还林工程、重点防护林工程、水土保持工程和天然草场恢复与建设工程等一批重点生态建设工程, 使陕西省特别是陕北地区植被状况有了明显好转, 抑制了陕北毛乌素沙漠南扩的势头^[16]。最新研究表明, 近 10 多年来, 陕西省部分区域的植被生长发生了重大变化。如栾金凯等^[17]利用 MODIS/Terra NDVI 时间序列遥感影像(2000—2016 年)和温度、降水气候数据, 分析了 17 年来陕西省榆林市的植被指数空间分布变化规律, 并且利用复直线回归法揭示了气象因素对植

被生长和演化的影响,榆林市一半以上的区域人类活动对植被生长起到了促进作用。邓晨晖等^[18]基于 MODIS/Terra NDVI 时间序列遥感影像(2000—2015 年)、DEM 和气象数据,采取趋势分析、多元回归残差法、偏最小二乘回归法,反映了秦岭地区植被覆盖度变化特征,探究其对气候变化和人类活动的双重响应机制。在区域尺度上,更早的研究集中在关中^[19]、陕北^[20-24]等地。在全省尺度上,韩红珠等^[25]利用 MODIS 数据提取了 2001—2016 年间的植被物候时空特征,结果表明退耕还林工程效益显著^[26-27]。目前,还没有相关研究报告利用公里空间分辨率数据从宏观尺度分析陕西全省的植被绿度时空变化特征及其人类活动影响区域分析,人类活动对陕西全省植被的影响程度和范围还缺乏全局了解。本文从全省尺度,细分为陕北、关中平原、陕南地区,利用可靠的 TSS-RESTREND 算法解释人类活动对陕西省 NDVI(2001—2018 年)的贡献影响程度,算法剥离了气候变化本身对 NDVI 的贡献影响,对学者、管理者摸清陕西全省植被绿度的长时间序列变化具有重要意义。同时,2019 年是陕西省全面实施退耕还林生态建设工程 20 周年,利用产品一致性较好的遥感时间序列产品,全面分析近 20 年来全省植被变化情况和客观评价生态建设工程成效,可为后续生态环境管理提供可靠的本底数据。

1 研究区概况

陕西省地理范围为 $105^{\circ}29' - 11^{\circ}15'E$, $31^{\circ}42' - 39^{\circ}35'N$ 之间(图 1),地处东部湿润地区和西部干旱区的交界地带,省内气候类型多样,各地的年均气温在 $7-6^{\circ}C$,属于典型的大陆性季风气候区。省内地形地貌类型丰富,地势特点是南北高,中间低,由西向东倾斜,年降水量受山地地形影响显著。自北向南可粗略划分为三大自然区域,分别为陕北黄土高原区、关中平原区和陕南秦巴山地区。陕北黄土高原区包括榆林地区和延安地区,海拔 $900-1600\text{ m}$,地势较高,地处干旱、半干旱地区,年均气温 $7-11^{\circ}C$,年降水量约 $400-600\text{ mm}$,地区分配不均,季节变化大。关中平原区由渭河干流以及两岸支流日久冲积、沉积形成,主要包含西安市、铜川市、宝鸡市、咸阳市和渭南市,地势相对较低,海拔在 $300-800\text{ m}$ 之间,中部较为平坦,年均气温 $11-13^{\circ}C$,年降水量约 $500-700\text{ mm}$,为温带半湿润气候。陕南秦巴山地处于秦岭和大巴山系,海拔 $200-1200\text{ m}$,主要包括汉中市、安康市、商洛市,水热条件相对较好,年均气温 $14-15^{\circ}C$,年降水量约 $700-900\text{ mm}$ 。同时,陕西省地处黄河中游、长江上中游地区,属于国家生态环境建设重点区域。

2 数据和方法

2.1 数据来源与预处理

本文使用的 NDVI 数据是 2001 年 1 月到 2018 年 12 月的 MODIS NDVI (MOD13A2)数据,出自美国国家航空航天局 NASA 发布的 EOS/MODIS 数据产品,空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$,时间分辨率为 16 d 。MODIS/NDVI 产品经过了水、云、重气溶胶等预处理,保证了数据质量,被广泛应用于区域植被覆盖变化研究。本文数据处理在谷歌地球数据云平台 (Google Earth Engine) 中处理,NDVI 数据获取 ID 为 MODIS/006/

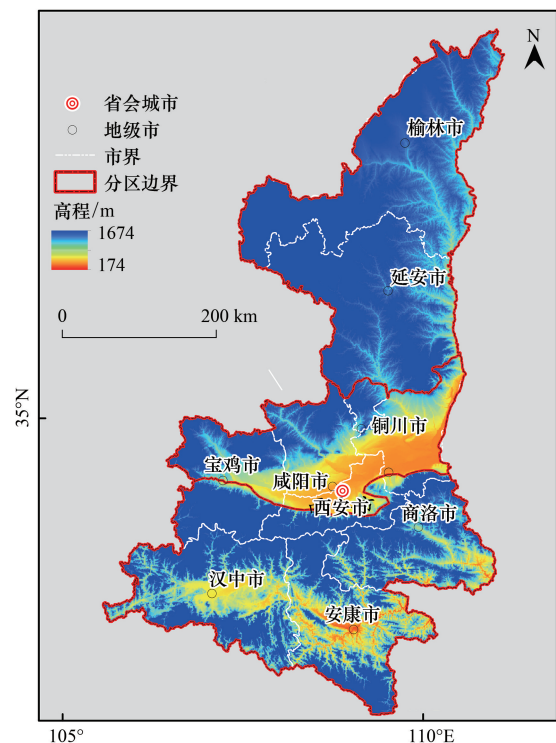


图 1 研究区位置意图

Fig. 1 Location map of the study area

MOD13A2,利用数据集的质量控制字段(SummaryQA),选取所有最优观测值(SummaryQA 等于 0)的最大值作为月 NDVI。

降雨数据为 1999—2018 年陕西省及其周边省份 33 个气象台站的月数据,来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。利用薄板样条空间插值算法^[28-29],得到 1999 年 1 月至 2018 年 12 月的 1 km 空间分辨率的逐月降水栅格数据。

2.2 生长季 NDVI 和降水观测时间序列统计

计算观测异常值。以生长季(6、7、8 月)降水异常值计算为例,利用生长季每个月的降雨插值图,计算如下变量:

- (1) 计算每一年生长季降水均值,即 3 个月(6、7、8 月)的平均值(mm);
- (2) 计算 2001—2018 年生长季降水均值(mm);
- (3) 用(1)除以(2)得到异常百分比(%)

同样地,计算生长季 NDVI 异常百分比。为了规避观测数据缺失带来的误差,我们没有计算 6、7、8 月的平均值,而只用 8 月的 NDVI 来代表生长季的 NDVI。

2.3 TSS-RESTREND 方法

标准 RESTREND 是由 Evans and Geerken^[9]开发并经 Wessels, Prince^[4]等人进一步修改。算法基于像素的分析,用于揭示气候要素和人类活动导致的植被生态系统的退化过程及其规律^[3, 30]。利用最小二乘回归(Ordinary Least Squares Regression, OLSR),计算植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)与降水量的关系,即植被—降水关系(Vegetation Precipitation Relationship, VPR),其中 NPP 用最佳生长季节 NDVI(NDVImax)表示^[5-6],降水量用最优累积降水量表示。根据 OLSR 模型得到的预测 NDVImax 与每次观测 NDVImax 的差值称为 VPR—残差^[9]。

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (1)$$

式中, y_i 是 VPR—残差, x_i 是年份, β_0 是截距, β_1 是斜率。

一般情况下,认为 VPR—残差的趋势与降水无关,是地表土地变化的表征^[9]。利用标准 RESTREND 算法,必须满足以下 3 个条件^[6]:

- 1) VPR 关系必须是正向(斜率>0)且显著的。对显著的推荐值为:在 $P<0.05$ 水平上, $R^2>0.3$ 。
- 2) VPR—残差在时间序列上是单调函数^[31]。

3) VPR 与时间高度相关,即 VPR 在时间序列上具有可比性,例如在研究区间内生态系统没有发生重大结构性变化^[5]。

在我们的研究中,最佳生长季 NDVI 发生在夏季,最优累积则是通过逐像素计算累积周期(1—12 个月)和偏移期(1—3 个月)的组合与 NDVImax 的相关系数,相关系数最高的降水累积量为最优累积降水。标准 RESTREND 算法有一定的局限性,当变化的速度和方向在时间序列中发生变化时,无法识别变化趋势^[32]。

TSS-RESTREND (Time series segmentation and residual trend) 能克服上述问题,最先被 Burrell, Evans^[6]提出并用于澳大利亚全境的植被变化分析,该方法的主要目的是首先利用 BFAST(Breaks for Additive Season and Trend)算法^[33-34]检测出 NDVI 时间序列的断点。不像之前的研究应用^[13, 35],在 TSS-RESTREND 中的 BFAST 算法不直接用于 NDVI 时间序列,而是用于 NDVI—降水关系的残差时间序列上,在此应用中关闭 BFAST 的季节成分(Seasonal Component)。

TSS-RESTREND 首先在研究时间段内利用 BFAST 算法找出 NDVI 时间序列的不一致年份。在每一个子时间段内,利用 Chow 检验准则判定不一致年份对植被 NDVI 的影响程度,当 F 检验在 $\alpha=0.05$ 水平时, BFAST 检测的不一致年份并没有改变植被的结构, BFAST 检测结果被驳回,对检测出来的时间段进行前后合并。TSS-RESTREND 有四种情形:

- (1) 当 VPR ($\alpha=0.05$) 和 VPR—残差 ($\alpha=0.05$) 显著相关,符合标准 RESTREND 算法。

(2) 当在 VPR—残差中检测到不一致年份, Chow 检验同样要再用于 VPR。当 VPR—残差 ($\alpha=0.05$) 显著而 VPR ($\alpha=0.05$) 不显著时, 采用分段 RESTREND 算法 (segmented RESTREND):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 z_i + \beta_3 x_i z_i \quad (2)$$

式中, x_i 为年份, z_i 为哑变量 (0 或者 1), β_0 为截距, β_1 为斜率, β_2 为断点处的抵消项, β_3 为断点处的斜率。

(3) 当一个像元在 VPR 中有显著断点时, 可能预示着生态系统的结构性改变。在这种情况下, 假定降雨对断点两侧的影响是一致的假设就不合理, 因此, 时间序列 NDVI 需要分段分析。为了使两侧的数据有可比性, 可以对降雨进行归一化得到一个标准项:

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

式中, z_i 为标准项, x_i 为观测值, μ 为时间序列均值, σ 为标准差。利用这个标准项, 可以建立如下多变量回归关系:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 z_i + \beta_3 x_i z_i \quad i = 2001, \dots, 2018 \quad (4)$$

式中, x_i 为式 (3) 计算的降水标准项, z_i 为哑变量 (0 或者 1), β_0 为截距, β_1 为斜率, β_2 为断点处的抵消项, β_3 为断点处的斜率。对一个像素而言, 像元绿度的变化需要包含残差的变化。

(4) 不符合上述条件的像素被认为不适宜用 TSS-RESTREND 算法。

根据上述回归关系中的 β_1 和显著性水平 $\alpha^{[7, 36]}$, 根据 NDVI 残差与时间序列的线性拟合, 我们利用 F 检验的 α 值将 NDVI 的变化趋势分为 9 个等级 (表 1)。NDVI 下降的趋势等级分为 4 个等级, 分别为 D1 ($\alpha < 0.01$), D2 ($0.01 \leq \alpha < 0.025$), D3 ($0.025 \leq \alpha < 0.05$) 和 DNC ($0.05 \leq \alpha < 0.1$), NDVI 增加的趋势等级分为 4 个等级, 分别为 I1 ($\alpha < 0.01$), I2 ($0.01 \leq \alpha < 0.025$), I3 ($0.025 \leq \alpha < 0.05$) 和 INC ($0.05 \leq \alpha < 0.1$)。NSC 为显著性水平不通过 ($\alpha > 0.1$), 表示 NDVI 无变化。

3 结果与讨论

3.1 2001—2018 年生长季 NDVI 时空分布与统计分析

图 2 展示了陕西省生长季最大 NDVI 在 2001—2018 年间的空间分布。从图中可以看出, NDVI 大小随纬度变化形成南北差异, 随地形起伏变化形成区域差异, 总体 NDVI 的空间分布特征与陕西省不同的地形地貌空间 (图 1) 具有较好的一致性, NDVI 时间序列南高北低, 关中平原包含少量低值区。

时间维度上, 全省 NDVI 平均值的年增长率为 0.006/年, 如图 3 所示。由于 2011 年研究区域生长季受云影响较大, 缺失值较多, 因此统计时去除 2011 年的 NDVI 值。该增长率超过了三北防护林 (0.0007/a)^[37]、黄河上游 (0.0023/a)^[38] 和三江源地区 (0.0001/a)^[39], 这说明退耕还林工程对陕西省的影响非常显著。截至 2018 年, 相比 18 年来的平均值 (图 4), 77.29% 的区域大于均值。其中, 陕北的榆林、延安大于均值的区域较大, 分别为 97.52% 和 89.03% (表 2), 秦巴山区次之, 为 73.91%。特别是 2012 年之后, NDVI 高值向北逐年推进趋势明显 (图 2)。

表 1 NDVI 变化分类

Table 1 NDVI change trends and types

编号 ID	变化方向 Change direction	显著性 Significance
I1	斜率 > 0	$\alpha < 0.01$
I2		$0.01 \leq \alpha < 0.025$
I3		$0.025 \leq \alpha < 0.05$
INC		$0.05 \leq \alpha < 0.1$
D1	斜率 < 0	$\alpha < 0.01$
D2		$0.01 \leq \alpha < 0.025$
D3		$0.025 \leq \alpha < 0.05$
DNC		$0.05 \leq \alpha < 0.1$
NSC		$\alpha > 0.1$

根据线性拟合得到的 F 检验的显著性水平和斜率, 可以将 NDVI 变化趋势分为增加、下降和基本不变 (No Significant Change, NSC); 其中增加细分为剧烈增加 (Dramatic Increase, I1) ($\alpha < 0.01$), 明显增加 (Obvious Increase, I2) ($0.01 \leq \alpha < 0.025$), 中等增加 (Moderate Increase, I3) ($0.025 \leq \alpha < 0.05$) 和轻微增加 (Slight Increase, INC) ($0.05 \leq \alpha < 0.1$)。下降细分为剧烈下降 (Dramatic Decrease, D1) ($\alpha < 0.01$), 明显下降 (Obvious Decrease, D2) ($0.01 \leq \alpha < 0.025$), 中等下降 (Moderate Decrease, D3) ($0.025 \leq \alpha < 0.05$) 和轻微下降 (Slight Decrease, DNC) ($0.05 \leq \alpha < 0.1$)。

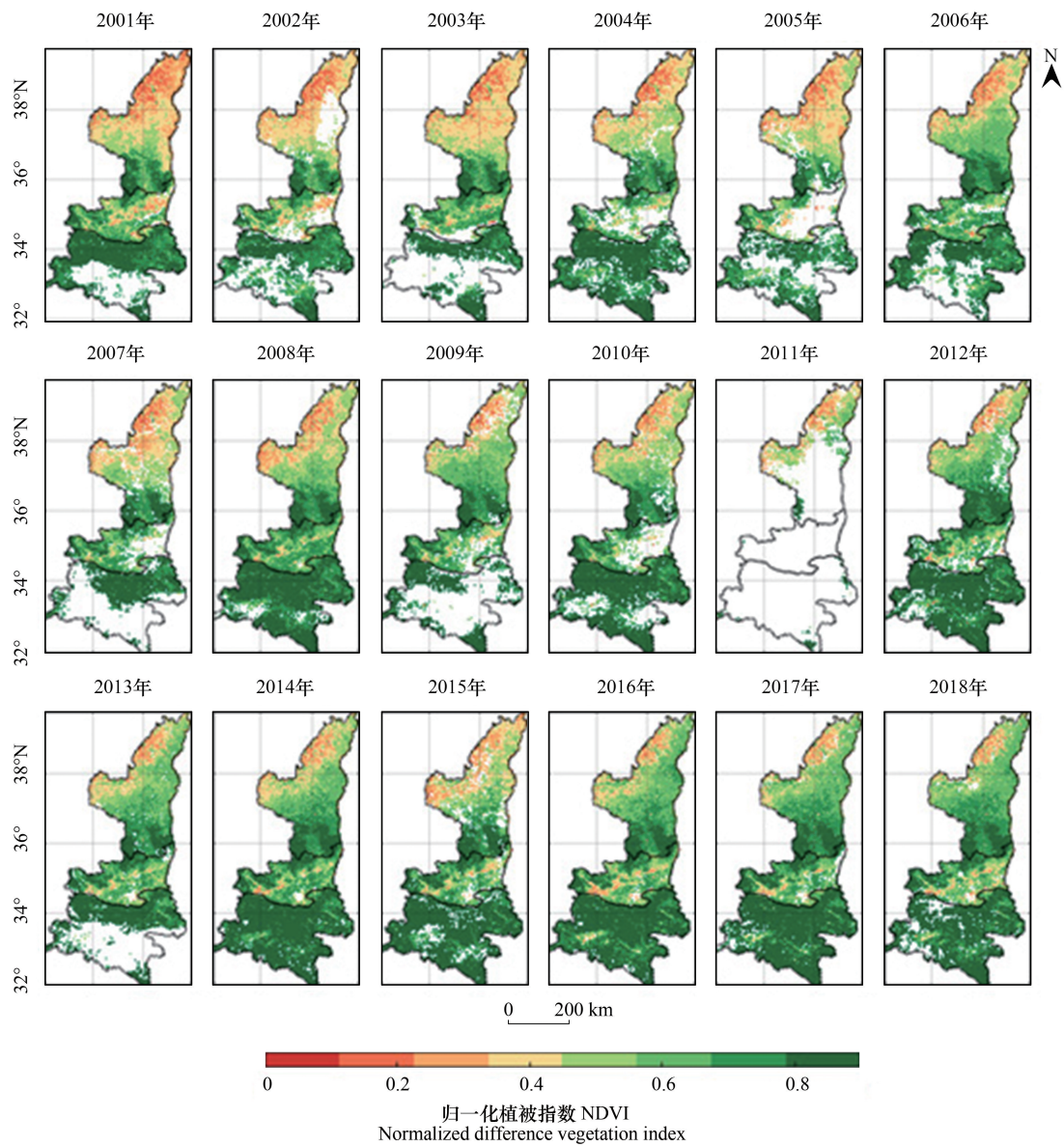


图 2 2001—2018 年陕西省年最大归一化植被指数

Fig. 2 Maximum NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) in Shanxi in August from 2001 to 2018

表 2 NDVI 与 18 年均值(2001—2018 年) 比较

Table 2 NDVI comparison with mean value during 2001 and 2018

区域 Zones	大于均值/% Greater than mean value	小于均值/% Less than mean value	不变/% Almost equal to mean value
全省 Shaanxi Province	77.29	22.65	0.06
榆林	97.52	2.48	0
延安	89.03	10.92	0.05
关中	49.58	50.37	0.05
陕南	73.91	25.99	0.1

3.2 人类活动造成的 NDVI 变化趋势与分级

利用 TSS-RESTREND 算法计算得到 NDVI 变化量如图 5 所示。2001—2018 年间,陕西省植被绿度受剧烈的人类活动影响,NDVI 呈增加态势,NDVI 增加的区域达 71.77%,而陕北地区的增加量明显大于关中平原

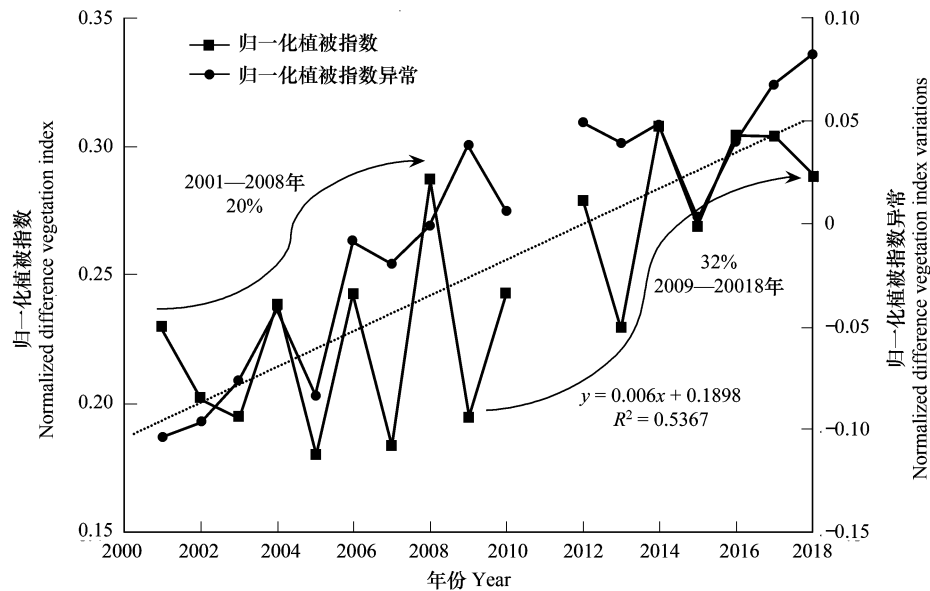


图3 2001—2018年陕西省生长季年NDVI曲线

Fig. 3 Variations in annual maximum NDVI and abnormal (%) in Shaanxi in August from 2001 to 2018

区和陕南秦巴山地,其中陕北的榆林NDVI增加区域为72.11%,延安为86.44%,均超过了全省平均水平,这是由于陕西省北部NDVI增长与人工造林面积密切相关,有关研究报道达96%以上,说明陕西省北部实施的退耕还林生态工程效果显著,据统计,2000—2014年间,陕北地区山地和沙地造林面积达 $238.6 \times 10^2 \text{ km}^2$ ^[40]。

NDVI减少区域主要分布在城市周边,如西安市、咸阳市、汉中市、安康市。如图所示。关中平原NDVI减少区域面积最大,占该区域的6.04%,秦巴山地次之(1.20%)。

(3)按照表1所示的绿度分级规则,可以将全省人类活动引起的NDVI变化量定性分为增长(INC,I1,I2,I3)、减少(D1,D2,D3)和无明显变化(NSC)8类,总体上陕西全省呈变绿趋势(图6)。榆林市和延安市的变绿区域明显多于关中平原和秦巴山地(图6,图7),在空间上呈连续分布,而关中平原和秦巴山地的变绿区域大部分呈点状分布。表3所示的TSS-RESTREND检测出的剧烈增长区域,延安为55.46%(11935.9 km²),榆林为34.34%(13825.7 km²),而陕南为41.03%(14746.8 km²),这说明处于湿润气候区的陕南地区也有显著变绿趋势,与已有研究结果一致^[18, 41]。在这里需要说明是,当NDVI和降雨量关系不符合TSS-RESTREND算法适用条件时,该像素不做任何处理。因此,表3的面积统计未包含算法不适用像元。虽然陕西省位于东部湿润和西部干旱过渡的半干旱地区,降雨要素是影响植被生长变化的首要气候要素,但是局部区域,如陕南秦巴山地,气温和水热因素也是抑制植被生长的重要要素。虽然TSS-RESTREND算法可以在算法层面剔除算法不适用的像元,但是人类活动对陕西南部植被的影响结果还须进一步论证。TSS-RESTREND算法内置的BFAST时间序列分析方法可以检测出VPR关系变化年份,从而可以扩大RESTREND算法的应用区域,并且可以反映NDVI变化带来的生态累积效应。图7展示了自2001—2018年,TSS-RESTREND检测的VPR断点年份。整体上,断点年份发生在2008年之后,这说明自2008年后,原有的植被NPP与降水的关系被打破,常规的RESTREND等趋势分析算法将不适用。断点年份发生在2008年之前的区域集中在关中平原西安市周边以及秦巴山区的安康市南部。需要说明的是,本文研究区间虽然是在2001—2018年,但是检测的断点年份却在2004—2016年,当绿度变化发生在研究时间段的前3年或者后3年期间时,TSS-RESTREND算法无法检测出断点年份,这是由于当生态系统结构状态的改变需要几年的适应周期,反映在NDVI上,显示出一定的滞后性^[36]。

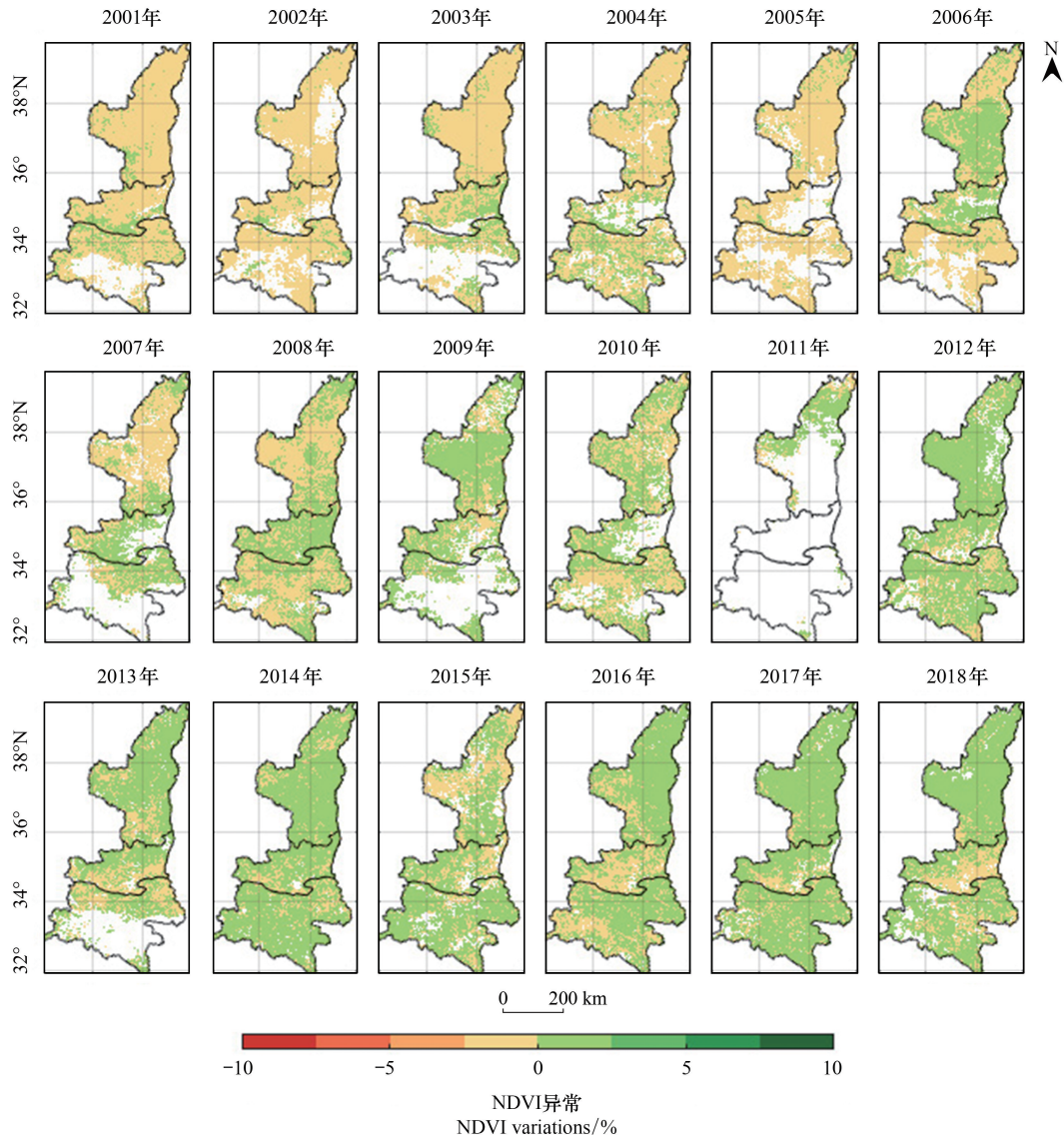


图 4 2001—2018 年陕西省生长季 NDVI 异常百分比
Fig.4 Maximum NDVI abnormal (%) in Shaanxi in August from 2001 to 2018

表 3 绿度分级统计

等级 Level	百分比 Percentage/%				面积 Area/km ²			
	榆林	延安	关中	陕南	榆林	延安	关中	陕南
剧烈减少(D1) Dramatic decrease	0.07	0.04	2.54	0.34	25	8	446.2	117.9
明显减少(D2) Obvious decrease	0.06	0.05	1.01	0.19	22.8	9.8	172.2	63.6
中等减少(D3) Moderate decrease	0.23	0.13	2.29	0.65	83.1	25.7	385.1	221.6
不变(NSC) No significant change	27.68	13.4	37.65	31.43	11154.3	2802	6715.5	11243.4
轻微增长(INC) Slight increase	11.29	7.77	7.41	7.63	4245.1	1578.9	1288.7	2655
中等增长(I3) Moderate increase	11.94	9.11	7.29	7.96	4544.5	1839.4	1267.3	2758.7
明显增长(I2) Obvious increase	14.39	14.04	9.09	10.77	5405.9	2788.1	1561.1	3719.1
剧烈增长(I1) Dramatic increase	34.34	55.46	32.73	41.03	13825.7	11935.9	5891.8	14746.8

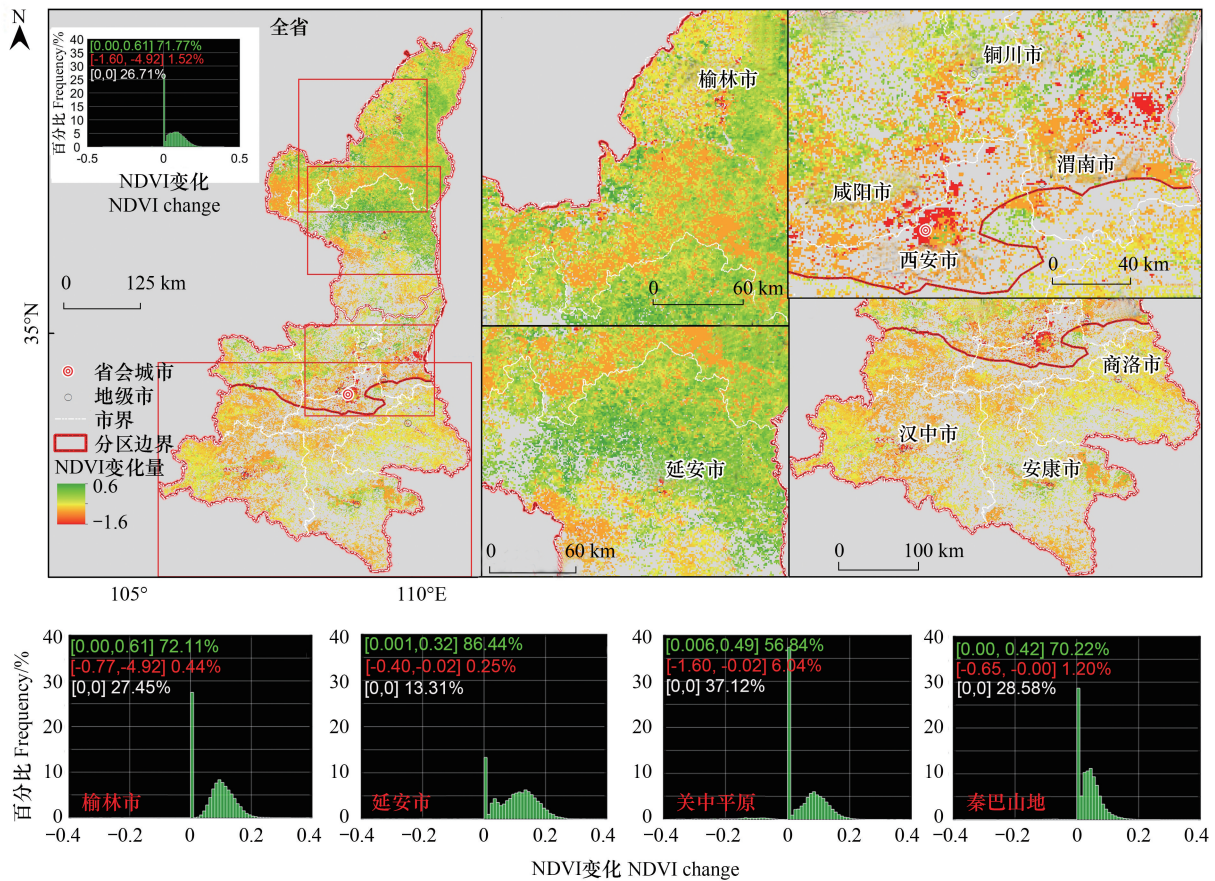


图5 2001—2018年陕西省NDVI变化量

Fig. 5 NDVI change by TSS-RESTREND in Shaanxi from 2001 to 2018

直方图上的绿色文字表示NDVI像元增加区域的NDVI变化量最小值和最大值,百分数代表增加像元占所有利用TSS-RESTREND算法检测的像元百分比;红色文字表示NDVI像元减少区域的NDVI变化量最小值和最大值,百分数代表减少像元占所有利用TSS-RESTREND算法检测的像元百分比;白色文字为NDVI变化量为0的百分比

4 结论

本文分析了自退耕还林生态工程实施以来的2001—2018年,陕西省NDVI的时空变化规律,利用TSS-RESTREND算法剥离了气候要素(降雨)对植被NDVI的影响,得到了人类活动对植被变化的影响程度和区域,主要结论如下:

- (1) 2001—2018年间,陕西省NDVI呈显著增加,全省平均增加速率为0.006/a;
- (2) 相比18年来的平均值,77.29%的区域大于均值。其中,陕北的榆林、延安大于均值的区域较大,分别为97.52%和89.03%,秦巴山区次之,为73.91%。2012年之后,NDVI高值向北逐年推进趋势明显。
- (3) 在只考虑降雨对植被的影响前提下,人类活动对植被的变化影响巨大,全省NDVI增加的区域达71.77%,而陕北地区的增加量明显大于关中平原区和陕南秦巴山地,其中陕北的榆林NDVI增加区域为72.11%,延安为86.44%,均超过了全省平均水平。
- (4) 总体上陕西全省呈变绿趋势。榆林市和延安市的变绿区域明显多于关中平原和秦巴山地,延安和榆林的剧烈增长区域分别为55.46%和34.34%,而陕南为41.03%,说明处于湿润气候区的陕南地区也有显著变绿趋势。

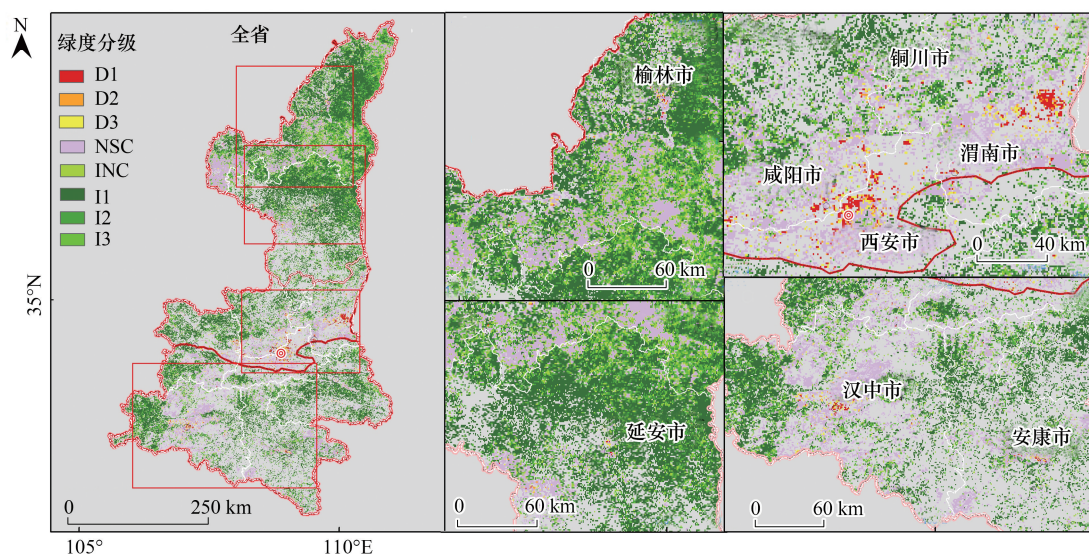


图6 2001—2018年陕西省绿度分级

Fig. 6 Greenness level determined by TSS-RESTREND in Shaanxi from 2001 to 2018

根据线性拟合得到的 F 检验的显著性水平和斜率, 可以将 NDVI 变化趋势分为增加、下降和基本不变 (No Significant Change, NSC)。其中增加细分为剧烈增加 (Dramatic Increase, I1) ($\alpha < 0.01$), 明显增加 (Obvious Increase, I2) ($0.01 \leq \alpha < 0.025$), 中等增加 (Moderate Increase, I3) ($0.025 \leq \alpha < 0.05$) 和轻微增加 (Slight Increase, INC) ($0.05 \leq \alpha < 0.1$)。下降细分为剧烈下降 (Dramatic Decrease, D1) ($\alpha < 0.01$), 明显下降 (Obvious Decrease, D2) ($0.01 \leq \alpha < 0.025$), 中等下降 (Moderate Decrease, D3) ($0.025 \leq \alpha < 0.05$) 和轻微下降 (Slight Decrease, DNC) ($0.05 \leq \alpha < 0.1$)。

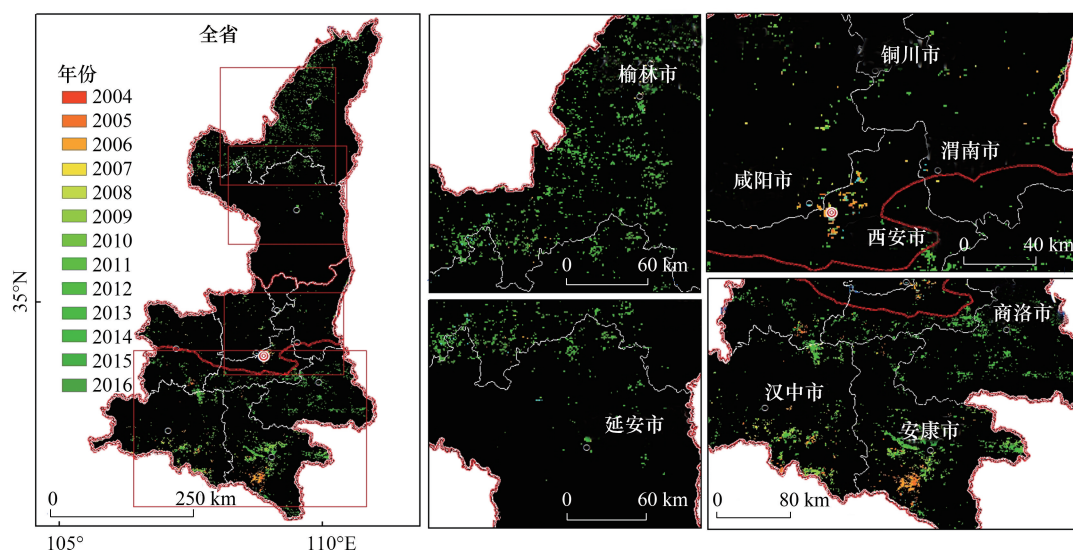


图7 断点年份检测

Fig. 7 Break year detection in Shaanxi from 2001 to 2018

参考文献 (References):

- [1] Shen Q, Gao G Y, Han F, Xiao F Y, Ma Y, Wang S, Fu B J. Quantifying the effects of human activities and climate variability on vegetation cover change in a hyper - arid endorheic basin. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3294-3304.
- [2] Wang L H, Tian F, Wang Y H, Wu Z D, Schurgers G, Fensholt R. Acceleration of global vegetation greenup from combined effects of climate

- change and human land management. *Global Change Biology*, 2018, 24(11): 5484-5499.
- [3] Higginbottom T P, Symeonakis E. Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: current frameworks and future directions. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9552-9575.
- [4] Wessels K J, Prince S D, Malherbe J, Small J, Frost P E, VanZyl D. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(2): 271-297.
- [5] Wessels K J, Van Den Bergh F, Scholes R J. Limits to detectability of land degradation by trend analysis of vegetation index data. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 125: 10-22.
- [6] Burrell A L, Evans J P, Liu Y. Detecting dryland degradation using Time Series Segmentation and Residual Trend analysis (TSS-RESTREND). *Remote Sensing of Environment*, 2017, 197: 43-57.
- [7] Li A, Wu J G, Huang J H. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: a critical application of RESTREND in inner Mongolia. *Landscape Ecology*, 2012, 27(7): 969-982.
- [8] Burrell A L, Evans J P, Liu Y. The impact of dataset selection on land degradation assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 146: 22-37.
- [9] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 535-554.
- [10] Zhu Z, Fu Y C, Woodcock C E, Olofsson P, Vogelmann J E, Holden C, Wang M, Dai S, Yu Y. Including land cover change in analysis of greenness trends using all available Landsat 5, 7, and 8 images: a case study from Guangzhou, China (2000-2014). *Remote Sensing of Environment*, 2016, 185: 243-257.
- [11] Zhu Z, Woodcock C E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 144: 152-171.
- [12] Huang H B, Chen Y L, Clinton N, Wang J, Wang X Y, Liu C X, Gong P, Yang J, Bai Y Q, Zheng Y M, Zhu Z L. Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 166-176.
- [13] Fang X Q, Zhu Q A, Ren L L, Chen H, Wang K, Peng C H. Large-scale detection of vegetation dynamics and their potential drivers using MODIS images and BFAST: a case study in Quebec, Canada. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 206: 391-402.
- [14] Cohen W B, Yang Z Q, Healey S P, Kennedy R E, Gorelick N. A LandTrendr multispectral ensemble for forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 205: 131-140.
- [15] Abel C, Horion S, Tagesson T, Brandt M, Fensholt R. Towards improved remote sensing based monitoring of dryland ecosystem functioning using sequential linear regression slopes (SeRGS). *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 317-332.
- [16] 李登科, 范建忠, 王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2896-2903.
- [17] 栾金凯, 刘登峰, 黄强, 冯九梁, 林木, 李国宝. 近 17 年陕西榆林植被指数的时空变化及影响因素. *生态学报*, 2018, 38(8): 2780-2790.
- [18] 邓晨晖, 白红英, 高山, 刘荣娟, 马新萍, 黄晓月, 孟清. 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. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 425-438.
- [19] 吴秉校, 侯雷, 宋敏敏, 吴发启. 西安市 NDVI 时空演变分析. *西北林学院学报*, 2016, 31(4): 213-220.
- [20] 何立恒, 周寅康, 杨强. 延安市 2000-2013 年植被覆盖时空变化及特征分析. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(11): 174-179.
- [21] 白建军, 白江涛, 王磊. 2000—2010 年陕北地区植被 NDVI 时空变化及其与区域气候的关系. *地理科学*, 2014, 34(7): 882-888.
- [22] 张茂省, 卢娜. 植被生态对气候变化和人类活动的响应——以陕西省榆林能源化工基地为例. *地质论评*, 2013, 59(5): 909-918.
- [23] 石玉琼, 郑亚云, 李团胜. 榆林地区 2000—2014 年 NDVI 时空变化. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 211-218.
- [24] Bai J J, Di L P, Bai J T. NDVI and regional climate variation since the implementation of revegetation program in Northern Shaanxi Province, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(11): 4581-4588.
- [25] 韩红珠, 白建军, 张波, 马高. 基于 MODIS 时序的陕西省植被物候时空变化特征分析. *国土资源遥感*, 2018, 30(4): 125-131.
- [26] 何慧娟, 卓静, 王娟, 董金芳, 权文婷. 陕西省退耕还林植被覆盖度与湿润指数的变化关系. *生态学报*, 2016, 36(2): 439-447.
- [27] 范建忠, 李登科, 周辉. 陕西省退耕还林工程区植被覆盖度的变化分析. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(4): 207-213, 223-223.
- [28] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(4): 385-403.
- [29] Hutchinson M F. ANUSPLIN Version 4.3. Australia: Fenner School of Environment and Society, Australian National University, 2004.
- [30] John R, Chen J Q, Kim Y, Ou-yang Z T, Xiao J F, Park H, Shao C L, Zhang Y Q, Amarjargal A, Batkhshig O, Qi J G. Differentiating anthropogenic modification and precipitation-driven change on vegetation productivity on the Mongolian Plateau. *Landscape Ecology*, 2016, 31(3): 547-566.

- [31] Jamali S, Jönsson P, Eklundh L, Ardö J, Seaquist J. Detecting changes in vegetation trends using time series segmentation. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 182-195.
- [32] Jamali S, Seaquist J, Eklundh L, Ardö J. Automated mapping of vegetation trends with polynomials using NDVI imagery over the Sahel. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 141: 79-89.
- [33] Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G, Culvenor D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 106-115.
- [34] Verbesselt J, Hyndman R, Zeileis A, Culvenor D. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12): 2970-2980.
- [35] Zhang Y, Peng C H, Li W Z, Tian L X, Zhu Q A, Chen H, Fang X Q, Zhang G L, Liu G B, Mu X M, Li Z B, Li S Q, Yang Y Z, Wang J, Xiao X M. Multiple afforestation programs accelerate the greenness in the 'Three North' region of China from 1982 to 2013. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 404-412.
- [36] Liu C X, Melack J, Tian Y, Huang H B, Jiang J X, Fu X, Zhang Z A. Detecting land degradation in eastern China grasslands with Time Series Segmentation and Residual Trend analysis (TSS-RESTREND) and GIMMS NDVI_{3g} Data. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 1014.
- [37] 王强, 张勃, 戴声佩, 邹悦, 马中华, 张亚宁. 基于 GIMMSAVHRRNDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化. *资源科学*, 2011, 33(8): 1613-1620.
- [38] Cao R, Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, Lv Z L, Chen Z. Inter-annual variations in vegetation and their response to climatic factors in the upper catchments of the Yellow River from 2000 to 2010. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(6): 963-979.
- [39] Liu X F, Zhang J S, Zhu X F, Pan Y Z, Liu Y X, Zhang D H, Lin Z H. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during 2000-2011. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 288-302.
- [40] Li S S, Yang S N, Liu X F, Liu Y X, Shi M M. NDVI-based analysis on the influence of climate change and human activities on vegetation restoration in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Region, Central China. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 11163-11182.
- [41] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 李双双. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因. *地理学报*, 2015, 70(5): 705-716.