

基于断点检测的延安市富县植被变化研究

季烨云^{1,2}, 刘鹏举^{1,2}, 高影^{1,2}, 任怡³, 余涛^{1,2}, 牛思圆^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院 国家林业和草原局林业遥感与信息技术重点实验室, 北京 100091; 3. 国家林业和草原局 调查规划设计院, 北京 100029)

摘要: 【目的】多项生态工程实施以来, 陕北黄土高原地区环境明显改善, 探究该区域植被的时空变化, 为生态环境建设与差异化决策提供依据。【方法】以陕西省延安市富县为研究对象, 利用 2000—2019 年生长季的 Landsat TM/ETM+/OLI 影像, 运用 DBEST 算法对归一化植被指数 (NDVI) 时间序列进行断点检测, 并提出多阶段趋势分析方法分析富县植被变化时空特征。【结果】富县植被的断点检测结果表明: 66.47% 的区域断点 NDVI 变化幅度小于 0.2, 主要分布在富县西部和东北地区, 植被相对稳定, 未发生剧烈变化; 33.53% 的区域断点 NDVI 变化幅度大于 0.2, 其中断点数量多于 4 个的区域仅占 5.88%, 集中分布于道路、河流沿线, 变化频繁, 与人为活动有关。当前阶段趋势分析表明: 断点 NDVI 变化幅度大于 0.2 的区域, 改善的面积占总面积的 24.57%, 退化面积仅占 2.12%; 开始时间均在 2014 年之前, 时间分布跨度大, 空间异质性强, 揭示了富县植被变化的多样性及复杂性; 富县有林地、疏林地、灌木林地、未成林造林地 4 种主要林地均趋于改善, 改善面积占林地面积的 96.23%。【结论】2000—2019 年, 富县植被整体呈现改善趋势, 生态建设工程取得良好的效果; 植被变化的时空特征存在差异, 后续决策需因地制宜。图 6 表 1 参 25

关键词: 归一化植被指数 (NDVI); 时间序列; DBEST; 变化检测

中图分类号: TP79 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)03-0540-07

Vegetation change based on break-point detection in Fu County, Yan'an City

Ji Yeyun^{1,2}, Liu Pengju^{1,2}, Gao Ying^{1,2}, Ren Yi³, Yu Tao^{1,2}, Niu Siyuan^{1,2}

(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Key Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information System, National Forestry and Grassland Administration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Survey & Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: [Objective] Given the significant environmental improvement after the implementation of ecological projects in the Loess Plateau of northern Shaanxi, this study is aimed to investigate the effect of ecological projects on vegetation improvement so as to provide reference for ecological construction and development countermeasures. [Method] With the Landsat TM/ETM+/OLI images in the growing season from 2000 to 2019 collected, the DBEST algorithm was used to detect breakpoints in the normalized difference vegetation index (NDVI) time series before a multi-stage trend analysis method was proposed to analyze the temporal and spatial dynamic of the vegetation change in Fu County, Yan'an City, Shaanxi Province. [Result] Results of break-point detection showed that 66.47% of the breakpoints showed a change magnitude of NDVI lower than 0.2, mainly distributed in the western and northeastern areas and the vegetation was relatively stable without drastic changes; 33.53% of the breakpoints showed a change magnitude of NDVI higher than 0.2 with areas

收稿日期: 2021-06-29; 修回日期: 2021-12-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0600906); “三北”防护林体系管理与服务平台 (林防合字 2019-17)

作者简介: 季烨云 (ORCID: 0000-0001-7711-2084), 从事地理信息系统技术与应用研究。E-mail: 15850781932@163.com。通信作者: 刘鹏举 (ORCID: 0000-0002-5502-6334), 副研究员, 从事林业地理信息系统应用与开发研究。E-mail: liupengju@ifrit.ac.cn

having more than 4 breakpoints accounting for only 5.88% and they were concentrated on roads and rivers with frequent changes in vegetation due to human activities. Results of trend analysis showed that for areas with a break-point change magnitude of NDVI higher than 0.2, the improved area accounted for 24.57% whereas the degraded area only accounted for 2.12%; Featured with a large time distribution span and a strong spatial heterogeneity, the current trends started before 2014, revealing the diversity and complexity of vegetation changes in Fu County; A trend of improvement was detected in all the four main types of forest land in Fu County, namely wood land, sparse wood land, shrub land and young afforested land with the improved area accounting for 96.23% of the total wood land. [Conclusion] Recent years have witnessed an overall improvement trend of the vegetation in the study area, showing the positive impact exerted by ecological construction projects and further ecological countermeasures should be formulated taking into consideration in accordance the differences in spatial characteristics of vegetation changes in Fu County from 2000 to 2019 as well as local circumstances. [Ch, 6 fig. 1 tab. 25 ref.]

Key words: normalized difference vegetation index (NDVI); time series; DBEST; change detection

植被是生态系统的重要组成部分，对全球气候变化和生态系统的结构功能都有显著影响^[1-3]。研究地表植被覆盖及其长期变化不仅可以揭示地表空间变化规律，而且有利于分析区域生态系统及环境变化情况^[4]，对因地制宜开展植被的保护管理工作具有重要意义。黄土高原位于黄河中游地区，是世界上水土流失最为严重的区域之一。陕北是黄土高原的中心部分，水土流失严重、生态环境脆弱，但自三北防护林、天然林资源保护、退耕还林还草等工程实施以来，该区域生态环境得到了明显改善。因此有必要开展工程实施效果阶段性评估，便于为今后该区域的林业生态建设和保护提供理论依据。

时间序列的遥感数据可以动态监测大面积的植被生长状况^[5-6]、发展变化趋势特征^[7-8]、扰动情况^[9-10]等。现有的大多数研究中，对归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 时间序列的分析多针对空间和时间总体变化展开^[11]，如 STOW 等^[12]提出用一元线性回归方法来分析每个栅格像元多年的变化趋势，以此来计算植被的绿色变化率 (greenness rate of change, GRC)。当植被遭遇砍伐、病虫害、火灾等自然灾害或人类活动影响时，植被绿色变化趋势可能会出现突然的转变。然而，一元线性回归方法只能表现植被变化的整体趋势，不能监测到以上趋势发生突然变化的情况，具有很大的局限性^[13-14]。因此，学者们提出了专用于处理遥感时序数据的断点检测方法，如 LandTrendr(Landsat based detection of Trends in Disturbance and Recovery) 方法^[15]、BFAST(breaks for additive seasonal and trend) 方法^[16]等。由于上述方法受限于卫星传感器、数据类型和数据序列长度等方面的不足，JAMALI 等^[17]提出了 DBEST (detecting breakpoints and estimating segments in trend) 算法，该算法不仅对卫星传感器类型和数据序列长度没有限制，而且支持周期性和非周期性植被指数时间序列，检测效果较好且具有普遍的适用性^[18-20]。

本研究以延安市富县为例，利用 2000—2019 年 Landsat 影像构建 NDVI 时间序列，运用 DBEST 算法识别 NDVI 时间序列的断点，分析断点的时空分布，并研究植被变化多阶段趋势特征，为生态修复工程规划和长期生态环境保护决策提供依据。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

富县位于陕西省北部，延安市南部，35°44′06″~36°23′23″N，108°29′30″~109°42′54″E，总面积为 4 182 km²，属于渭北黄土高原丘陵沟壑地带。该县属大陆性暖温带季风气候，四季分明，年平均气温为 7~9 ℃，年平均降水量为 500~600 mm。区域内分布着丰富的森林资源，乔木树种主要有栎类 *Quercus* spp.、桦木 *Betula* spp.、刺槐 *Robinia pseudoacacia* 等；灌木主要有胡颓子 *Elaeagnus pungens*、马桑 *Coriaria nepalensis*、白刺花 *Sophora davidii* 等。居民地、河流、铁路和公路分布概况如图 1 所示。

1.2 数据来源及预处理

Landsat TM/ETM+/OLI 多光谱遥感影像来源于美国地质调查局提供的地表反射率 (surface reflectance,

SR) 产品, 即 L2 级别产品 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), 空间分辨率为 30 m, 时间分辨率为 16 d, 光谱范围包括可见光、近红外、短波红外和热红外波段^[21]。由于 2003 年之后的 Landsat 7 ETM+影像出现数据条带丢失的问题, 因此需先利用 ENVI 软件中的 Landsat_gapfill 插件去除此类影像中的条带^[22]。然后利用 Fmask 云检测算法对所有影像进行云、云影识别提取^[23]。最后利用红色和近红外波段计算 NDVI, 并基于最大值合成法^[24](maximum value composite, MVC) 合成了 2000—2019 年的 NDVI 时间序列数据。

本研究还收集了研究区 2019 年的林地类型, 数据来源于国家森林资源智慧管理平台中的“森林资源一张图”数据, 用于分析不同林地的植被变化情况。各类型面积如图 2 所示: 有林地 2 664.77 km², 疏林地 82.80 km², 灌木林地 554.95 km², 未成林造林地 253.85 km², 其他用地 625.63 km², 包括人造地表、水体、耕地等。

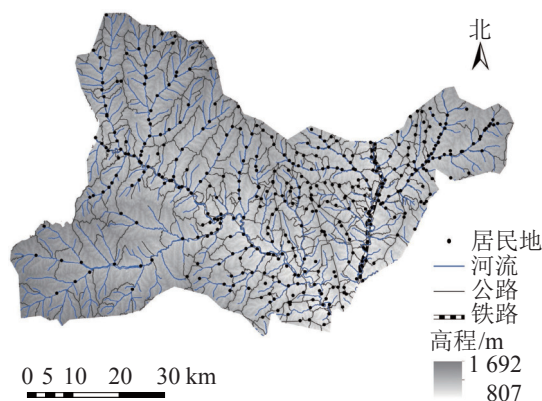


图 1 2019 年富县基础地理信息示意图

Figure 1 Basic geographic information of Fu County in 2019

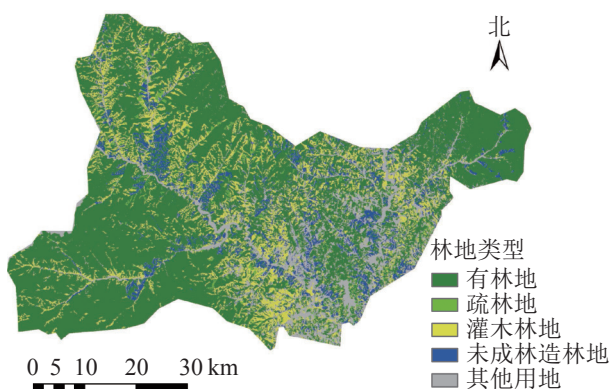


图 2 2019 年富县林地类型与分布示意图

Figure 2 Forest land types and distribution of Fu County in 2019

2 研究方法

2.1 断点检测方法

DBEST 算法主要是由时间序列分解和趋势分割两部分组成^[17]。时间序列分解主要是指植被指数时间序列数据的预处理过程, 而趋势分割是实现断点检测的过程。由于本研究对生长季 NDVI 数据采用最大值生成年度 NDVI 数据, 因此时间序列分解部分未进行以局部移动平均为基础的季节趋势分解 (seasonal-trend decomposition procedure based on Loess, STL), 仅利用水平位移第 1 阈值 θ_1 、水平位移第 2 阈值 θ_2 、持续时长 φ 共 3 个参数检测候选断点。趋势分割 (即断点检测) 包括 3 个过程: ①找到时间序列的转点 (即峰/谷点、距离阈值点和水平位移点); ②通过下一个转点减去当前转点处的 NDVI 值来计算局部趋势变化 (trend local change, TLC); ③所有转点按 TLC 降序重新排列, 利用贝叶斯信息准则 (bayesian information criterion, BIC) 确定断点数量, 若 BIC 准则得到的断点数量少于转点数量, 则最终的断点数为 BIC 准则得到的结果。

运用 DBEST 算法检测断点, 设置参数如下: 水平位移第 1 阈值 (θ_1) 为 0.1, 即当时序 NDVI 数据变化超过 0.1 时认为该点是候选水平位移点; 水平位移第 2 阈值 (θ_2) 为 0.2, 即当候选水平位移点前后最小步长范围内的子序列均值变化超过 0.2 认为候选水平位移点符合第 2 阈值; 持续时长 (φ) 为 2 a, 在该时段内只能有 1 个水平位移点, 以检测 NDVI 短时间内的平均变化; 以上 3 个参数可确定时间序列中的水平位移点。变化级别 (β)、泛化百分比 (δ)、断点数目 (m) 共 3 个参数可根据需求三选一达到不同的目的。由于富县植被覆盖率较高, NDVI 位于 -0.2~0.2 之间的变化在原始影像上的目视解译不太明显, 因此本研究将 β 设为 0.2, 可保留 β 大于 0.2 的断点, 以便于检测较为显著的变化。算法输出变化开始时间 (即断点位置)、变化结束时间、变化幅度和变化持续时长。

2.2 NDVI 趋势分析

2.2.1 总体趋势 本研究利用一元线性回归方法来拟合每个像元年内 NDVI 最大值 ($I_{\text{NDVI}(\text{max})}$) 的 annual 变化趋势^[24]:

$$S_{\text{NDVI}} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i I_{\text{NDV}(\max)}^i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n I_{\text{NDV}(\max)}^i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}。$$

其中： i 为年序号； n 为总年数； $I_{\text{NDV}(\max)}$ 为年内 NDVI 最大值； $I_{\text{NDV}(\max)}^i$ 为第 i 年的 $I_{\text{NDV}(\max)}$ ； S_{NDVI} 为 NDVI 年内最大值的年际变化趋势。将基于一元线性回归方法得到的富县 2000—2019 年 NDVI 时间序列的趋势定义为总体趋势。依据宋怡等^[25]提出的分类标准将趋势划分为 3 种类型：退化 ($S_{\text{NDVI}} \leq -0.0010$)、基本不变 ($-0.0010 < S_{\text{NDVI}} \leq 0.0010$)、改善 ($S_{\text{NDVI}} > 0.0010$)。

2.2.2 多阶段趋势 ① 对 NDVI 时间序列进行断点检测，分析断点及 NDVI 变化幅度的时空分布。② 针对未检测到断点或 NDVI 变化幅度小于 0.2 的区域，研究其总体趋势；针对断点 NDVI 变化幅度大于 0.2 的区域，对其进行多阶段趋势分析。多阶段趋势分析过程如下：以 NDVI 时间序列的所有断点及对应的变化结束时间对其进行分段，分别进行拟合，从而得到趋势序列。断点及对应的变化结束时间生成的拟合段定义为变化段，除了变化段以外的拟合段定义为趋势段。当前阶段趋势定义为最末一段趋势段。趋势类型按 2.2.1 中标准分类。对于多趋势段区域，研究其当前阶段趋势，以分析植被的现状。对于持续时长小于 5 a 的趋势段，由于时间太短，不进行趋势分析。③ 根据林地类型分析林地总体趋势和当前阶段趋势的变化情况。

3 结果与分析

3.1 断点检测与分析

应用 DBEST 算法对富县 NDVI 时间序列数据进行断点检测，时间序列中第 1 断点 NDVI 变化幅度的空间分布与不同幅度面积占比如图 3 所示。发生正向变化的区域占全县面积的 79.34%；负向变化的区域占 20.66%，多位于道路两侧及居民点附近 (图 1)。NDVI 变化幅度为 $-0.2 \sim 0.2$ 的区域占总面积 66.47%，主要位于西部及东北地区，植被发生的变化较小；变化幅度绝对值超过 0.2 的区域占总面积的 33.53%，位于富县的东部及河流道路周围区域，属于 NDVI 剧烈变化的区域。

图 4 显示：2000—2019 年间富县 NDVI 变化幅度大于 0.2 的区域断点个数的空间分布及各类型的面积占比。其中，66.47% 的区域断点 NDVI 变化幅度小于 0.2，主要分布在富县西部和东北地区，说明 NDVI 变化幅度小，植被相对稳定，因此不作进一步分析。断点 NDVI 变化幅度大于 0.2 的区域占总面积的 33.53%，其中断点数量为 1 或 2 个的区域占总面积的 21.59%，位于东部地区；断点数量多于 4 个的区域，仅占 5.88%，集中分布于道路、河流沿线，植被变化频繁，与人为活动有关。

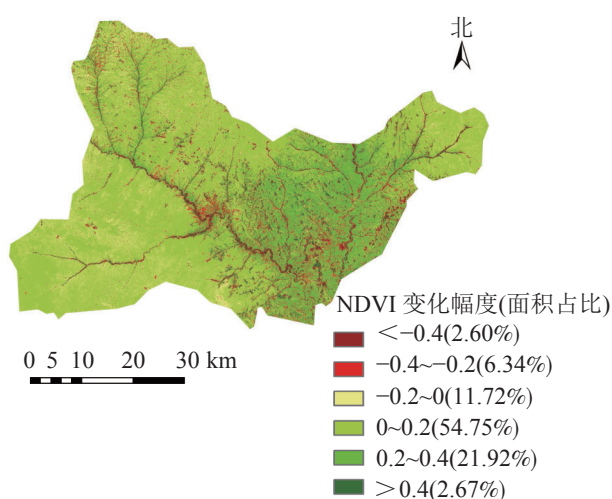


图 3 富县归一化植被指数变化幅度及其面积占比

Figure 3 Change magnitude and area percent of NDVI in Fu County

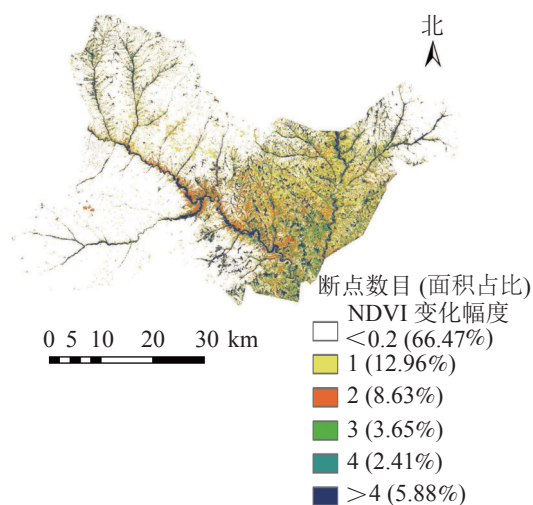


图 4 富县不同 NDVI 变化幅度小于 0.2 与大于 0.2 的断点数目及其面积占比

Figure 4 Number of breakpoints and area percent of NDVI (<0.2 and >0.2) in Fu County

3.2 NDVI 时间序列趋势分析

3.2.1 总体趋势 富县 NDVI 总体趋势有很强的空间差异。对趋势值进行分类,得到不同类别的分布及面积(图 5)。20 a 间富县超过 97% 的区域植被呈改善趋势;退化区域占比不足 2%,植被改善的面积远大于退化的面积。退化区域集中分布在富县东部区域、道路及河流沿线,在西北部散落分布,其中东部部分人造地表退化面积较大;基本不变的区域面积最小,不足 1%,分布较零散。

3.2.2 多阶段趋势 基于 3.1 断点检测结果,对 2000—2019 年富县 NDVI 时间序列进行多阶段趋势分析。由于 66.47% 的区域无断点,因此该区域只分析总体趋势;33.53% 的区域具有 1 个及以上断点,对该区域时间序列进行分段,分析多阶段趋势中的

当前阶段趋势。当前阶段趋势统计结果及分布(图 6A)表明:27.57% 的区域当前阶段趋势持续时长大于 5 a,植被当前阶段改善的面积远大于退化的面积,改善面积占 24.54%,分布于东部区域及道路河流沿线的周边区域;退化面积仅占 2.12%,基本不变面积不足退化面积的一半,分布较零散。当前阶段趋势的开始时间(图 6B)均在 2014 年之前,时间分布跨度大;开始于 2002 年的区域面积最大,占 12.76%,且均为改善趋势,表明经历一次变化以后,区域植被一直呈现改善状态;其次是开始于 2014 年的区域,占 3.68%,主要位于道路、河流沿线;其余年份所占面积均不足 2%。

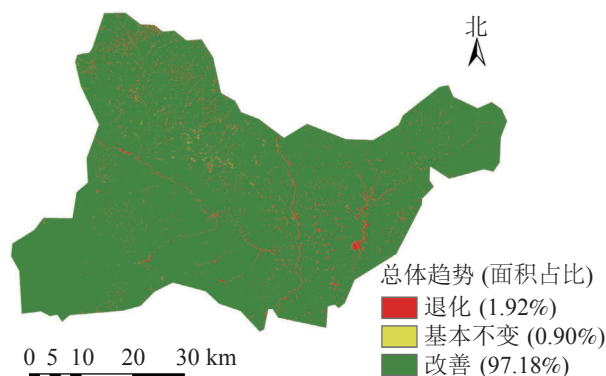


图 5 2000—2019 年富县 NDVI 时间序列总体趋势类别及其面积占比

Figure 5 Overall trend level and area percent of NDVI time series in Fu County from 2000 to 2019

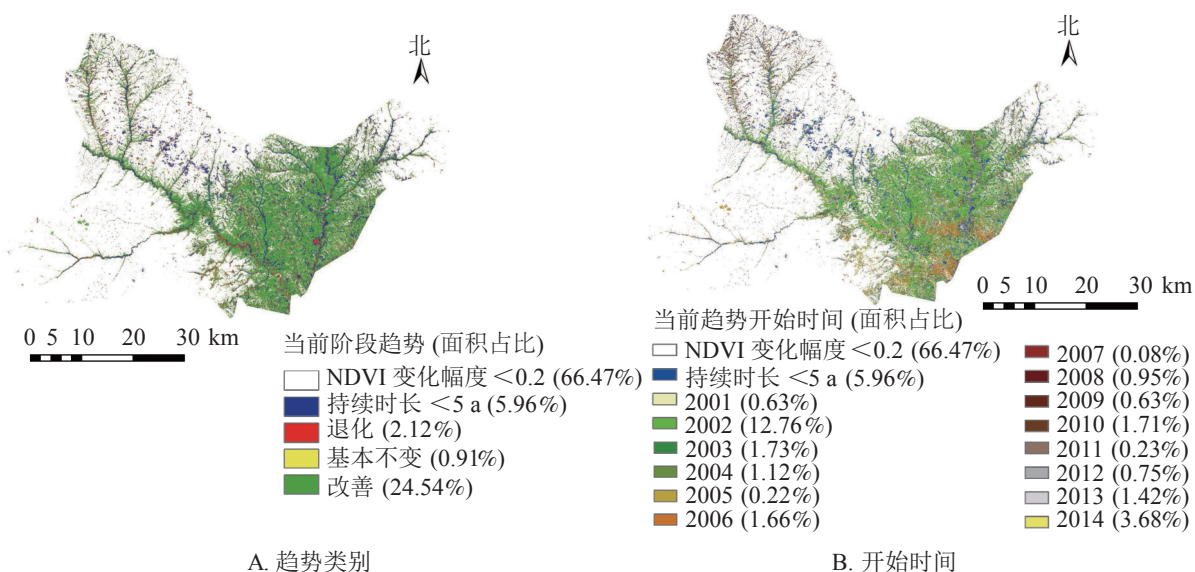


图 6 2000—2019 年富县 NDVI 时间序列当前阶段趋势及其面积占比

Figure 6 Current stage trend and area percent of NDVI time series in Fu County from 2000 to 2019

3.3 不同林地趋势分析

如图 2 所示:富县植被退化的区域大部分分布在西北、西南、东北以及中部的一些地区,如今中部地区以及一些道路沿线已经变为永久性的建设用地;其他大部分均已改善,大多变为有林地和疏林地。2019 年富县林地类型中,有林地占 63.72%,疏林地占 1.98%,灌木林地占 13.27%,未成林造林地占 6.07%,4 种林地占富县总面积的 85.04%。如表 1 所示:有林地、疏林地、灌木林地、未成林造林地

表 1 富县林地类型趋势情况统计

林地类型	改善/%	基本不变/%	退化/%
有林地	96.98	0.86	2.16
疏林地	94.32	1.91	3.77
灌木林地	94.41	1.81	3.78
未成林造林地	92.97	1.91	5.12
其他用地	86.66	2.50	10.84

的改善面积占其总面积的比例分别为 96.98%、94.32%、94.41%、92.97%，其他用地改善和基本不变的比例分别为 86.66% 和 2.50%，退化的比例达 10.84%，由于其他用地包括建设用地，说明大部分退化与城市和道路建设相关。整体来说，富县生态建设工程取得了良好的效果，大部分林地处于改善的趋势，特别是有林地和灌木林地。

4 结论

本研究基于断点检测的多阶段趋势分析方法，研究了陕西省富县近 20 a 植被的时空变化特征，得到以下结论：①第 1 断点检测结果表明：富县发生正向变化的区域面积大，占 79.34%。检测结果中 NDVI 变化幅度小于 0.2 的区域占 66.47%，主要分布在富县西部和东北地区，植被相对稳定；大于 0.2 的区域占 33.53%，其中断点数量为 1 或 2 个的区域比例为 21.59%，位于东部地区；断点数量多于 4 个的区域，仅占 5.88%，集中分布于道路、河流沿线，变化频繁，与人为活动有关。②植被的多阶段趋势表明：富县共有 27.57% 的区域当前阶段趋势持续时长大于 5 a，当前阶段趋势为改善的面积占 24.54%，分布于东部区域及道路河流沿线的周边区域；为退化的面积占 2.12%，基本不变面积仅占 0.91%，分布均较零散。当前阶段趋势的开始时间均在 2014 年之前，时间分布跨度大，空间异质性强，揭示了富县植被变化的多样性及复杂性。③近年来富县有林地、疏林地、灌木林地、未成林造林地均是改善情况明显，其中有林地和灌木林地中的改善比例最大。林地中呈改善态势的面积占全县总面积的 81.83%，富县生态建设工程取得了良好的效果。同时对于检测到退化区域的林地，需要进一步分析，采取有效措施提高质量。

1999 年以来，富县积极响应国家号召，实施退耕还林、荒山荒地造林、封山育林等措施。这些生态工程建设促进了植被的恢复，然而在不同地区的效果是存在差异的。本研究获得的 NDVI 的变化直接反映了植被恢复的效果，但 DBEST 算法参数设置对分析结果的影响、趋势变化与影响因素的关系尚不清楚，在后续研究中，需从多尺度应用 DBEST 算法，探究其应用技术，并综合考虑气温、降水、人为因素等对趋势变化的影响。

5 参考文献

- [1] HEIMANN M, REICHSTEIN M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks [J]. *Nature*, 2008, **451**(7176): 289 – 292.
- [2] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, **33**(24): 7853 – 7862.
XU Hanguo. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(24): 7853 – 7862.
- [3] 许文鑫, 周玉科, 梁娟珠. 基于变化点的青藏高原植被时空动态变化研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, **34**(3): 667 – 676.
XU Wenxin, ZHOU Yuke, LIANG Juanzhu. A breakpoints based spatio-temporal analysis of Tibetan Plateau vegetation [J]. *Remote Sensing Technol Appl*, 2019, **34**(3): 667 – 676.
- [4] CAO Qian, WU Jianguo, YU Deyang, *et al.* The biophysical effects of the vegetation restoration program on regional climate metrics in the Loess Plateau, China [J]. *Agric For Meteorol*, 2019, **268**: 169 – 180.
- [5] HANSEN M C, POTAPOV P V, MOORE R, *et al.* High-resolution global maps of 21st-century forest cover change [J]. *Science*, 2013, **342**(6160): 850 – 853.
- [6] 孙雷刚, 刘剑锋, 徐全洪. 河北坝上地区植被覆盖变化遥感时空分析[J]. 国土资源遥感, 2014, **26**(1): 167 – 172.
SUN Leigang, LIU Jianfeng, XU Quanhong. Remote Sensing based temporal and spatial analysis of vegetation cover changes in Bashang area of Hebei Province [J]. *Remote Sensing Land Resour*, 2014, **26**(1): 167 – 172.
- [7] 刘咏梅, 马黎, 黄昌, 等. 基于 MODIS-Landsat 时空融合的陕北黄土高原植被覆盖变化研究[J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2019, **49**(1): 62 – 70.
LIU Yongmei, MA Li, HUANG Chang, *et al.* Study on the change of vegetation coverage of Loess Plateau in northern Shaanxi Province based on MODIS-Landsat fusion data [J]. *J Northwest Univ Nat Sci Ed*, 2019, **49**(1): 62 – 70.
- [8] QAMER F M, SHEHZAD K, ABBAS S, *et al.* Mapping deforestation and forest degradation patterns in western Himalaya, Pakistan [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(385): 1 – 17.
- [9] 沈文娟, 李明诗, 黄成全. 长时间序列多源遥感数据的森林干扰监测算法研究进展[J]. 遥感学报, 2018, **22**(6): 1005 – 1022.
SHEN Wenjuan, LI Mingshi, HUANG Chengquan. Review of remote sensing algorithms for monitoring forest disturbance

- from time series and multi-source data fusion [J]. *J Remote Sensing*, 2018, **22**(6): 1005 – 1022.
- [10] 刘宝柱, 方秀琴, 何祺胜, 等. 基于 MODIS 数据和 BFAST 方法的植被变化监测[J]. 国土资源遥感, 2016, **28**(3): 146 – 153.
- LIU Baozhu, FANG Xiuqin, HE Qisheng, *et al.* Monitoring the changes of vegetation based on MODIS data and BFAST methods [J]. *Remote Sensing Land Resour*, 2016, **28**(3): 146 – 153.
- [11] FORKEL M, CARVALHAIS N, VERBESSELT J, *et al.* Trend change detection in NDVI time series: effects of inter-annual variability and methodology [J]. *Remote Sensing*, 2013, **5**(5): 2113 – 2144.
- [12] STOW D, PETERSEN A, HOPE A, *et al.* Greenness trends of Arctic tundra vegetation in the 1990s: comparison of two NDVI data sets from NOAA AVHRR systems [J]. *Int J Remote Sensing*, 2007, **28**(21): 4807 – 4822.
- [13] 李斌. 青藏高原植被时空分布规律及其影响因素研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- LI Bin. *Study of Vegetation's Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors on the Tibetan Plateau*[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [14] 海月, 杨广斌, 李若男, 等. 基于时序突变检测的植被空间变化特征识别方法研究——以海河北部山区为例[J]. 生态学报, 2020, **40**(24): 1 – 10.
- HAI Yue, YANG Guangbin, LI Ruonan, *et al.* Recognition of vegetation spatial variation based on time-series mutation detection: a case study of the mountainous area of Northern Haihe River Basin [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(24): 1 – 10.
- [15] KENNEDY R E, YANG Zhiqiang, COHEN W B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr-Temporal segmentation algorithms [J]. *Remote Sensing Environ*, 2010, **114**(12): 2897 – 2910.
- [16] VERBESSELT J, HYNDMAN R, NEWNHAM G, *et al.* Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series [J]. *Remote Sensing Environ*, 2010, **114**(1): 106 – 115.
- [17] JAMALI S, JONSSON P, EKLUNDH L, *et al.* Detecting changes in vegetation trends using time series segmentation [J]. *Remote Sensing Environ*, 2015, **156**: 182 – 195.
- [18] 刘吉彤, 安如. 基于 DBEST 的 2003—2012 年济南市植被变化研究[J]. 甘肃科学学报, 2018, **30**(4): 17 – 23.
- LIU Jitong, AN Ru. Study on vegetation change in Ji'nan during 2003–2012 based on DBEST [J]. *J Gansu Sci*, 2018, **30**(4): 17 – 23.
- [19] 王恩鲁, 汪小钦, 陈芸芝. 时间序列植被覆盖度断点检测方法研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, **19**(10): 1355 – 1363.
- WANG Enlu, WANG Xiaoqin, CHEN Yunzhi. The breakpoints detection method using time series of vegetation fractional coverage [J]. *J Geo-Inf Sci*, 2017, **19**(10): 1355 – 1363.
- [20] SHEN Xiaoji, AN Ru, FENG Li, *et al.* Vegetation changes in the Three-River Headwaters Region of the Tibetan Plateau of China [J]. *Ecol Indic*, 2018, **93**: 804 – 812.
- [21] 王颖洁, 刘良云, 王志慧. 基于时序 Landsat 数据的三江平原植被地表类型变化遥感探测研究[J]. 遥感技术与应用, 2015, **30**(5): 959 – 968.
- WANG Yingjie, LIU Liangyun, WANG Zhihui. Land covermapping based on Landsat time-series stacks in Sanjiang Plain [J]. *Remote Sensing Technol Appl*, 2015, **30**(5): 959 – 968.
- [22] 贾铎, 王藏姣, 牟守国, 等. 基于 NDVI 时间序列轨迹的草原露天矿区植被时空动态特征[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(6): 1808 – 1816.
- JIA Duo, WANG Cangjiao, MU Shouguo, *et al.* Vegetation spatial and temporal dynamic characteristics based on NDVI time series trajectories in grassland opencast coal mining [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28**(6): 1808 – 1816.
- [23] 陈昀琳. 基于 Landsat 和 MODIS NDVI 时序数据的青海湖流域植被覆盖度提取及其变化分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- CHEN Yunlin. *Fractional Vegetation Cover in Qinghai Lake Watershed Extraction and Change Analysis based on Time-series NDVI Data of Landsat and MODIS*[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [24] 李杰, 张军, 刘陈立, 等. 基于 MODIS-NDVI 的中老缅交界区近 16 年植被覆盖时空变化特征[J]. 林业科学, 2019, **55**(8): 9 – 18.
- LI Jie, ZHANG Jun, LIU Chenli, *et al.* Spatiotemporal variation of vegetation coverage in recent 16 years in the border region of China, Laos, and Myanmar based on MODIS-NDVI [J]. *Sci Silv Sin*, 2019, **55**(8): 9 – 18.
- [25] 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 – 94.
- SONG Yi, MA Mingguo. Study on vegetation cover change in Northwest China based on SPOT VEGETATION data [J]. *J Desert Res*, 2007, **27**(1): 89 – 94.