

# 陕西省植被覆盖时空变异及其恢复潜力

李媛媛, 孙景妍, 杨香云, 齐雁冰

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 系统分析退耕还林以来植被覆盖时空变异特征, 评估植被恢复的潜力, 为陕西省生态环境建设的可持续发展提供科学的理论依据和实施建议。[方法] 以 MODIS NDVI 数据为基础, 采用 Sen+Mann-Kendall 模型和 Hurst 指数探究了 2000—2020 年陕西省及秦巴山区、关中平原和黄土高原 3 个亚区植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)的时空变化特征, 并运用相似生境法测算了不同区域的植被恢复潜力。[结果] ①2000—2020 年陕西省 FVC 增长率为 0.002 9/a, 74.58% 的区域有所改善。其中: 黄土高原区 FVC 改善面积达 84.46%, 且以显著改善为主; 秦巴山区 FVC 改善面积为 74.40%, 以轻微改善为主; 而关中平原区 FVC 具有退化趋势, 退化区域占 64.56%。②全省 FVC 持续性改善面积占 19.80%, 黄土高原区和秦巴山区以持续性改善为主, 面积比例分别为 27.83% 和 13.68%, 而关中平原区以持续性退化为主。③黄土高原区西北部及其与关中平原接壤地带的植被恢复空间较大, 而子午岭林区植被恢复空间较小; 秦巴山区森林覆盖率较高, 几乎没有恢复空间; 关中平原受城市化的影响, 植被恢复空间小。[结论] 近几十年来, 陕西省植被覆盖度显著提高, 但受气候、地形、植被类型和人类活动等因素的影响, 植被覆盖变化具有明显的空间异质性。陕西省植被恢复的增长速度趋于放缓, 持续改善能力已经较低, 植被覆盖趋于平稳, 但是黄土高原西北部地区及其与关中平原的接壤处植被覆盖恢复潜力仍较大。

**关键词:** FVC; Sen+Mann-Kendall; Hurst 指数; 植被恢复潜力; 陕西省

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)01-0346-11

**中图分类号:** S157.2

**文献参数:** 李媛媛, 孙景妍, 杨香云, 等. 陕西省植被覆盖时空变异及其恢复潜力[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 346-356. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.034; Li Yuanyuan, Sun Jingyan, Yang Xiangyun, et al. Spatio-temporal variation of fractional vegetation cover and its recovery potential in Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 346-356.

## Spatio-temporal Variation of Fractional Vegetation Cover and its Recovery Potential in Shaanxi Province

Li Yuanyuan, Sun Jingyan, Yang Xiangyun, Qi Yanbing

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The spatio-temporal variation characteristics of vegetation cover since returning farmland to forest were systematically analyzed. The potential of vegetation restoration were evaluated, in order to provide scientific theoretical basis and implementation suggestions for the sustainable development of ecological environment construction in Shaanxi Province. [Methods] The spatial and temporal variations of fractional vegetation cover (FVC) were investigated from 2000 to 2020 based on MODIS NDVI data, the Sen+Mann-Kendall method and Hurst index. Vegetation restoration potential was assessed by using the 'similar habitat method' in Shaanxi Province, as well as in three subregions of the Loess Plateau, Qinling-Bashan Mountain, and the Guanzhong Plain. [Results] ① The average growth rate of FVC in Shaanxi Province was 0.002 9/a from 2000 to 2020, and 74.58% of the area had increased in FVC. Areas of significant and slight FVC increase were detected in the Loess Plateau and Qinling-Bashan Mountain where 84.46% and 74.40% of the areas, respectively, showed increased FVC. Slight FVC degradation trends were detected in the Guanzhong Plain where 64.56% of the area, showed decreased FVC. ② The areas showing persistent

收稿日期: 2023-05-07

修回日期: 2023-08-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“黑垆土腐殖质层诊断特性构建与系统分类研究”(42277310); 陕西省科技计划项目“陕西省土壤信息服务平台”(2022PT-28)

第一作者: 李媛媛(1997—), 女(汉族), 内蒙古自治区乌海市人, 硕士研究生, 研究方向为资源环境监测。Email: lyy71@nwfufu.edu.cn.

通信作者: 齐雁冰(1976—), 男(汉族), 河南省周口市人, 博士, 教授, 主要从事资源环境监测与评价方面的教学与研究工作。Email: ybqi@nwsuaf.edu.cn.

increase in FVC accounted for 19.80% of the entire Shaanxi Province, and accounted for 27.83% and 13.68% in the Loess Plateau and Qinling-Bashan Mountain, respectively. The area showing persistent decreases in FVC were predominantly in the Guanzhong Plain. ③ For the Loess Plateau region, greater vegetation recovery potential areas were detected in the northern area and the transitional area with the Guanzhong Plain, and the vegetation recovery potential was low in the Ziwuling forest area. Low vegetation recovery potentials were found in the Qinling-Bashan Mountain and Guanzhong Plain areas because of the high vegetation coverage background and the high rate of urbanization, respectively. [Conclusion] Shaanxi Province experienced significant FVC increases during 2000—2020 due to it being a key region of ecological project implementation. However, the heterogeneous spatial-temporal variation of FVC was affected by climate, topography, plant species, and human activities. The growth rate of vegetation restoration in Shaanxi Province tended to slow down, the continuous improvement ability has been lower, and the vegetation cover tended to be stable. However, the northwest region of the Loess Plateau and its border with Guanzhong Plain still has a large potential for vegetation cover restoration.

**Keywords:** FVC; Sen+Mann-Kendall; Hurst index; vegetation restoration potential; Shaanxi Province

植被衰退、水土流失、荒漠化等问题不但是中国西部大开发的重要生态阻力,也是威胁区域生态安全和农户增收的重要因素。中国 1999 年启动退耕还林(草)工程,其所带来的生态效益及对世界绿度提高的贡献也得到国内外的普遍赞誉<sup>[1]</sup>。陕西省作为率先实施退耕还林工程的重点省份,工程实施以来的成就举世瞩目,全省 2000—2015 年植被覆盖度增速达 0.008 78/a<sup>[2]</sup>,绿色版图向北推进 400 km,特别是陕西北部黄土高原区植被覆盖的提高带来的水土流失治理成效更是显著<sup>[3]</sup>。然而,在实施的退耕还林区域,近些年有研究表明,部分实施退耕还林工程的地区树木存活率仅为 24%<sup>[3]</sup>;某些区域由于植树区域的蒸发量高于灌木和草地区域,在植树数年后土壤逐渐干燥,导致树木生长发育不良<sup>[4]</sup>,这些问题导致植被恢复的速度有所减缓,甚至有些区域出现植被再次退化的现象<sup>[5-6]</sup>。究其原因可能是因为部分地区的植被受气候、地形地貌、植被类型等自然因素的条件限制,恢复潜力已经接近阈值。因此,监测陕西省植被动态变化、评估植被恢复潜力是开展区域生态恢复的基础,有利于持续提高退耕还林效益,对促进生态建设的可持续发展提供了理论依据和科学指导。植被在生态系统中发挥着至关重要的作用,不仅能够保持空气清新、水分充足、土壤肥沃等,还能促进生物多样性和环境保护,为维持生态系统的平衡起到了重要作用<sup>[7-8]</sup>。区域植物群落的形成与变化记录着当地自然地理环境的变迁及人类活动对土地开发和改造的历程,因此植被覆盖变化的研究是了解和分析生态系统变化的重要切入点。传统对植被覆盖变化监测的研究通常是以实地测量为主<sup>[9]</sup>,通常适用于小区域内精准测量植被信息。遥感技术在植被动态监测中的应用日益频繁,尤其是随着“3S”技术的发展,遥感卫星提供了大量包括多种时间尺度和多种分辨率的数据,

能够为区域植被覆盖度反演监测提供有力支持,特别是对大范围、长时间序列的研究至关重要。近年来已经有多种植被指数用于监测区域植被的变化,如归一化植被指数(normalized vegetation index, NDVI)、比率植被指数(ratio vegetation index, RVI)、增强植被指数(enhanced vegetation index, EVI)、叶面积指数(leaf area index, LAI)、植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)。其中, FVC 是指植被植株冠层或叶面在地面的垂直投影面积占植被区总面积的比例<sup>[10]</sup>。在环境生态系统变化监测<sup>[11]</sup>、水文和生态模型构建<sup>[12]</sup>、植被项目生态效益评估等<sup>[4]</sup>领域具有广泛应用。因此,监测植被覆盖变化是了解和分析区域生态系统环境变化的重要途径。

国内外学者构建了诸如元细胞自动机(cellular automata, CA)、马尔可夫模型(Markov)、CLUE-S 及 FLUS(future land use simulation model)等模型用以模拟和预测土地利用变化,这些模型也广泛应用于植被覆盖变化的模拟和预测中。Wang Lixia 等<sup>[13]</sup>研究发现 CA-Markov 模型在进行植被覆盖预测时发现植被覆盖的疏密程度及自然因素的不确定性会削弱植被变化的可预测性。单一模型在描述多因素作用下的植被覆盖变化的复杂特征时具有一定的局限,特别是在地貌和气候类型复杂多样的陕西省<sup>[14]</sup>。Zhang Daojun 等<sup>[15]</sup>结合了“环境特征相似”和“空间位置临近”提出了“相似生境法”这一研究植被恢复的新视角,可以综合不同的影响因素,以小的环境单元来表征陕西省复杂的环境特征,通过研究单元内植被的生长发育状态从而合理高效地估算植被恢复潜力。近年来人们对植被恢复的研究的重视度越来越高,以相似生境法为理论基础构建植被恢复潜力模型已得到一些研究成果,相关的理论和技术也日臻成熟<sup>[16-19]</sup>。本文以开展退耕还林工程较早的陕西省为

例,在系统分析退耕还林以来植被覆盖时空变异特征的基础上,运用“相似生境法”评估植被恢复的潜力,为陕西省生态环境建设的可持续发展提供科学的理论依据和实施建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省地处中国中部、黄土高原中游地区,位于北纬 31°41′—39°35′,东经 105°29′—111°15′,总面积 2.06×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>。全省南北狭长,地势南北高,中部低,海拔范围为 174~3 732 m(图 1)。全省纵跨亚热带、暖温带、温带 3 个热量带,具有大陆性季风气候特征,年均气温 9~16℃,年均降水量 400~900 mm,年日照时数 1 307~3 050 h,全省根据气候、地表特征和海拔高度,可以分为秦巴山区、关中平原区和黄土高原区 3 个子地形区。南部的秦巴山区约占全省总面积的 36%,地处亚热带气候带,水热条件优越,地貌结构复杂,垂直气候带表现突出。中部的关中平原区约占全省面积的 19%,属暖温带半湿润气候,热量充足而降水较少,土壤肥沃,是重要的农业生产基地。北部黄土高原区约占全省面积的 45%,属温带干旱半干旱气候,地形破碎,沟壑纵横,具有典型的黄土地貌特征,土壤侵蚀严重。

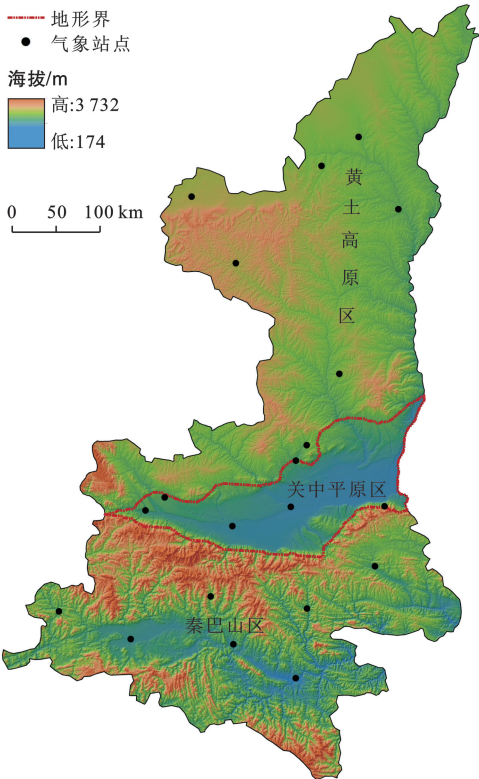


图 1 陕西省地形地貌分区

Fig.1 Topographic and geomorphic regions of Shaanxi Province

1.2 数据来源及处理

1.2.1 遥感数据 本文使用 NASA 发布的 MODIS 陆地标准产品 MOD3Q1 NDVI 进行植被覆盖度(FVC)的计算 (<https://www.earthdata.nasa.gov/>),该数据空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,时间跨度为 2000 年 2 月到 2020 年 11 月。首先将影像数据导入 MRT(MODIS Reprojection Tools)工具进行投影、频带分离和拼接,再导入 ArcGIS 进行空值填充后裁剪得到陕西省影像数据集,并利用最大值合成法(MVC)合成逐年的 NDVI 数据。

NDVI 转换为 FVC 的公式为<sup>[20]</sup>:

$$FVC = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s) \quad (1)$$
式中:NDVI<sub>s</sub> 为只包含土壤信息的像素(近似值为 0);NDVI<sub>v</sub> 为像素只包含植被信息(近似值为 1)。为了排除个别极端值对计算结果的影响,分别使用置信度为 5%和 95%的 NDVI 值作为 NDVI<sub>s</sub> 和 NDVI<sub>v</sub>。

1.2.2 气象数据 气象数据包括陕西省 20 个气象站点的月平均气温(℃)、月总降水总量(mm)和日照时数(h)数据(图 1),来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>)。先将气象站点数据导入 ArcGIS 中进行插值,其中气温和日照时数数据采用克里金插值、降水数据采用反距离权重法插值。插值结果依据数值大小分别将降水和日照时数等间距划分为 10 个等级,将气温等间距划分为 5 个等级,用以生态单元划分。利用相关系数法逐像元计算 FVC 数据与气象数据(气温、降水、日照时数)在当月及前 1~6 个月的相关系数,并利用 MVC 求得每个像元的相关系数最大值作为该像元的滞后期,公式为<sup>[21]</sup>:

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

式中: $R_{xy}$  为两个变量的相关系数; $x_i$  为第  $i$  年/月 FVC 数据; $y_i$  为第  $i$  年/月气象数据; $\bar{x}$  为多年/月 FVC 数据的平均值; $\bar{y}$  为多年/月气象数据的平均值; $n$  为样本数。

本研究利用 MATLAB 软件分别建立研究区 FVC 与 3 个气候因子的回归模型,并进行 0.05 显著水平验证。

1.2.3 地形数据 地形数据利用 SRTA DEM 提取([www.gscloud.cn](http://www.gscloud.cn)),空间分辨率为 90 m,进行投影、拼接、裁剪等预处理后用于提取海拔、坡度、坡向、起伏幅度等地形指标。其中,海拔以 500 m 为间隔划分为<500,500~1 000,1 000~1 500,1 500~2 000 和>2 000 m 5 级;坡度分级参照《第三次全国国土调查技术规程》的分级标准<sup>[22]</sup>;坡向分级采用“四分

法”<sup>[23]</sup>;地形起伏度分为平原、台地、丘陵、小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地 6 级<sup>[24]</sup>。

1.2.4 植被区划数据 本研究使用的植被区划数据源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>),将数据进行投影和矢一栅转换后得到研究区植被区划栅格数据。研究区共包含温带南部森林(草甸)草原带,温带南部典型草原亚地带,中亚热带常绿阔叶林北部亚地带,北亚热带常绿、落叶阔叶混交林地带,暖温带南部落叶栎林地带和暖温带北部落叶栎林地带 6 个植被区(见图 2)。

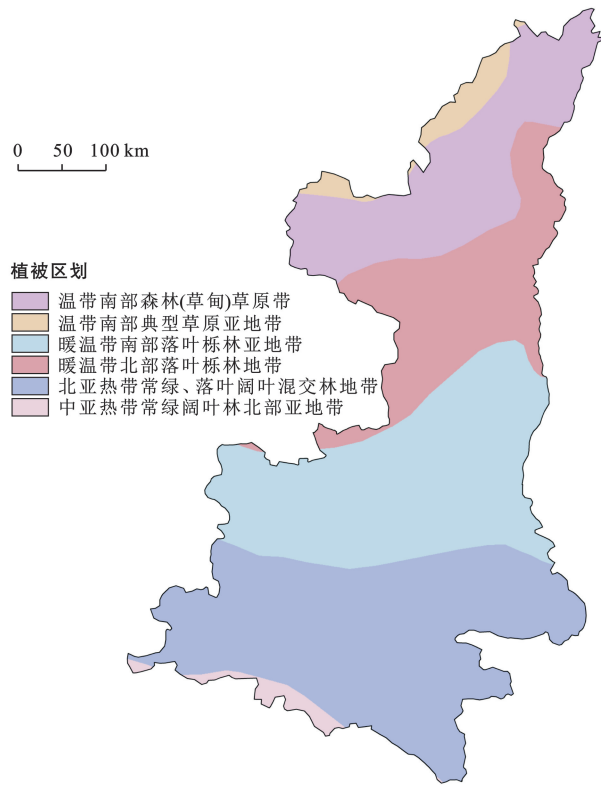


图 2 陕西省植被区划

Fig.2 Vegetation zoning of Shaanxi Province

1.2.5 土地利用数据 2018 年 30 m 土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>)。用于去除研究区的耕地、城镇用地等对植被覆盖变化影响极小的区域。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 FVC 变化持续性分析

(1) Sen + Mann-Kendall 趋势分析。Sen + Mann-Kendall 趋势分析法结合了 Sen 趋势度和 Mann-Kendall 方法的优势,在长时序植被覆盖变化趋势的显著性检验中得到广泛应用<sup>[25]</sup>。相对于传统的线性回归分析,这种分析方法可以有效地消除测量误差,降低离群点的影响<sup>[26]</sup>。

Sen 趋势度计算公式为:

$$\beta = \text{median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (3)$$

式中:median 为数据的中位数; $j$  和  $i$  分别为第  $j$  年和第  $i$  年 FVC 数据; $\beta$  表示时间序列的变化趋势,当  $\beta > 0$  时,时间序列呈递增趋势。

Mann-Kendall 趋势检验法即对于序列  $X_i = (x_1, x_2 \cdots x_n)$ ,先确定序列中所有对偶值  $(x_i, x_j, j > i)$  中  $x_i$  和  $x_j$  的大小(设为  $S$ )之间的关系。通过公式(3)检验统计量  $S$  是否有增加或减少的趋势:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases} \quad (5)$$

在本研究中, $n > 10$ ,使用检验统计量  $Z$  进行趋势检验。公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (6)$$

$\text{var}(S) =$

$$\frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)]}{20} \quad (7)$$

式中:var 为数据的方差; $n$  表示序列样本容量; $m$  为序列中重复数据的数量; $t_i$  为第  $i$  组重复数据中重复数据的数量。对  $Z$  进行双边趋势检验,在显著性水平为  $\alpha$  的正态分布表中确定临界值  $Z_{1-\alpha/2}$ 。当  $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$  时,该序列不具有显著性; $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$  时,该序列具有显著性。

本文将 FVC 时间序列数据的趋势分为以下 4 类:

$$\beta \begin{cases} \beta > 0 \begin{cases} |Z| > 1.96 & (\text{显著改善}) \\ |Z| \leq 1.96 & (\text{轻微改善}) \end{cases} \\ \beta < 0 \begin{cases} |Z| > 1.96 & (\text{显著退化}) \\ |Z| \leq 1.96 & (\text{轻微退化}) \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

(2) Hurst 指数。Hurst 可以对长时序数据的长期相关性进行定量分析,在生态环境监测、社会经济数据分析、自然灾害预警等领域得到广泛应用。它可以有效地反映时间序列的可持续性,可以应用于植被覆盖度的预测<sup>[27]</sup>。计算方法为:

对于时间序列  $\{FVC_\tau\} (\tau \in N)$ ,定义均值序列为:

$$\overline{FVC_\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} FVC_t \quad (\tau = 1, 2 \cdots n) \quad (9)$$

累计离差：

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (FVC u - \overline{FVC \tau}) \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (10)$$

极差：

$$R \tau = \max_{(1 \leq t \leq \tau)} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (\tau = 1, 2 \cdots n) \quad (11)$$

标准差：

$$S(\tau) = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (FVC t - \overline{FVC \tau})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\tau = 1, 2 \cdots n) \quad (12)$$
$$\frac{R \tau}{S \tau} = (c \tau)^H \quad (13)$$

式中： $H$  即为 Hurst 指数； $c$  为常数； $\tau$  为 FVC/LAI 的时序长度； $t$  为年份变量。

当  $0 < H < 0.5$  时，代表输入的长时序数据具有反持续性，未来变化趋势与现有趋势不同，且反持续性随  $H$  的减小而增强；当  $H = 0.5$  时，代表输入的长时序数据具有随机性，未来的变化趋势与现有趋势无关；当  $0.5 < H < 1$  时，代表输入的长时序数据具有持续性，未来变化趋势与现有趋势相同，且持续性随  $H$  的增大而增强。持续性等级划分如下：强反持续性 ( $H \leq 0.4$ )、弱反持续性 ( $0.4 < H \leq 0.5$ )、弱持续性 ( $0.5 < H \leq 0.6$ )、强持续性 ( $\geq 0.6$ )<sup>[17]</sup>。

1.3.2 植被恢复潜力测算 基于“生境越相似的区域，植被恢复潜力越接近”的原则，将气候条件(降水、日照时数、气温)、地形条件(海拔、坡度、坡向、地形起伏度)和植被区划进行叠加分区。为方便统计植被立地条件的分区，将面积小于 2.5 km<sup>2</sup> 的区域与周围区域进行合并，共形成 FVC 生境单元 4 734 个，每个生境单元均具有相似的环境要素，单元内部视为可以达到相同的植被覆盖程度。本文选取 2000—2020 年植被覆盖均值最高的月份(8 月)进行植被恢复潜力值的计算。分别统计每个生境单元内植被覆盖的最大值、95%分位数值、90%分位数值和平均值<sup>[19]</sup>。为减少统计过程中产生的误差，选取 95%分位数值作为该单元内植被恢复潜力值。根据植被恢复潜力值和植被覆盖数据，可计算生境单元内的植被恢复潜力指数(vegetation restoration potential index, VRPI)<sup>[18]</sup>：

$$VRPI = \frac{VRP_{ij} - VC_{ij}}{VRP_{ij}} \quad (14)$$

式中： $VRP_{ij}$  为植被恢复潜力值； $VC_{ij}$  为现在的 FVC 值。

本研究着重考虑自然因素对植被覆盖恢复的影响，数据处理过程中，根据土地利用数据剔除了研究区内的水域和城乡、工矿、居民用地。

2 结果与分析

2.1 陕西省植被覆盖时空变化特征

2000—2020 年陕西省平均 FVC 介于 59.85%~67.41% 之间，平均值为 64.38%，整体呈波动增长趋势，平均增长率为 0.002 9/a(图 3)。在 3 个亚区中，黄土高原区植被覆盖相对较低，FVC 变化范围为 36.33%~50.43%，但研究期内呈现持续增长的趋势，年均增长率达 0.006 3/a；秦巴山区植被覆盖情况最好，FVC 值高达 87.24%~91.47%，研究期内植被覆盖保持平稳；关中平原区 FVC 介于 47.45%~66.93% 之间，研究期内整体下降。

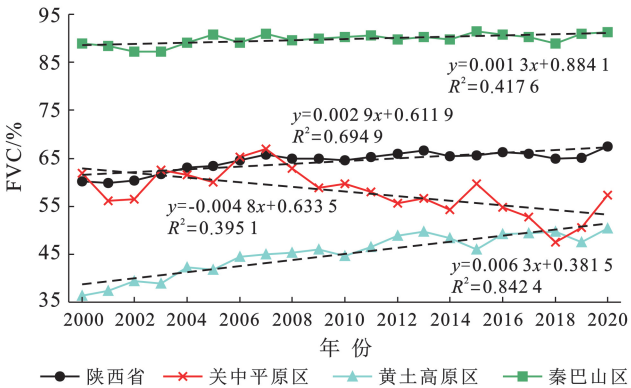


图 3 2000—2020 年陕西省植被覆盖度(FVC)年均值变化  
Fig.3 Annual average fractional vegetation cover (FVC) from 2000 to 2020 in Shaanxi Province

在 2000—2020 年，省内 74.58% 的地区 FVC 呈现改善的趋势，其中显著改善区域面积占全省的 36.73%，主要分布在黄土高原东部地区；25.42% 的区域呈退化趋势，主要分布在关中平原，其中显著退化区域面积占全省的 16.94%，在研究区内零星分布(图 4 和表 1)。在黄土高原 FVC 改善的区域面积比例高达 84.46%，是全省改善状况最好的区域。其中 50.03% 的区域表现为显著改善。关中平原是唯一一个 FVC 退化面积高于 FVC 改善面积地区，仅有 12.80% 的区域呈现为显著增加的趋势。秦巴山区 FVC 呈改善趋势的区域面积为 74.40%，但整体呈现轻微的改善，全区仅有 27.77% 的区域呈显著改善趋势。

表 1 2000—2020 年陕西省植被覆盖度(FVC)变化趋势面积比例统计

Table 1 Proportion of fractional vegetation cover (FVC) change trends from 2000 to 2020 in Shaanxi Province %

区域	显著退化	轻微退化	轻微改善	显著改善
黄土高原区	12.35	3.19	34.43	50.03
关中平原区	27.01	37.55	22.64	12.80
秦巴山区	19.49	6.11	46.63	27.77
陕西省	16.94	8.48	37.85	36.73

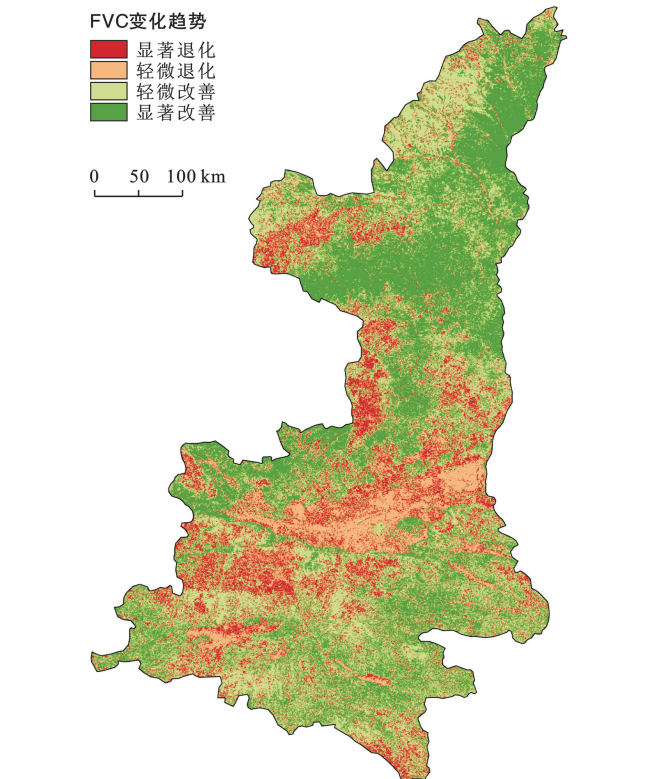


图 4 2000—2020 年陕西省植被覆盖度 (FVC) 变化趋势  
Fig.4 Fractional vegetation cover (FVC) change trend from 2000 to 2020 in Shaanxi Province

2.2 陕西省植被覆盖持续性分析

对 2000—2020 年 FVC 进行逐像元的 Hurst 指数计算,并统计了各持续性等级的面积比例(见表 2 和图 5)。陕西省 FVC 持续性分布具有一定的空间差异性,但差异性较小,表现为由南向北持续性先增大,后减小的趋势。全省 FVC 的 Hurst 指数值在 0.09~0.96 之间,平均值为 0.45,表明陕西省 FVC 整体呈弱反持续性,总体呈稳定性发展趋势。全省弱反持续性比例最大,为 39.47%;强反持续性比例仅次于弱反持续性比例,为 32.69%,主要分布于黄土高原东部和秦巴山区;弱持续性比例为 21.52%,略小于强反持续性比例;强持续性比例最小,仅为 6.32%,集中分布于黄土高原东南部和关中平原东部。全省反持续性比例为 72.16%,持续性比例为 27.84%,总体以反持续性为主。在 3 个地形区中,关中平原的持续性面积比例最高,为 41.85%,而秦巴山区持续性面积比例仅为 18.39%。

表 2 2000—2020 年陕西省植被覆盖度 (FVC) 持续性面积比例统计  
Table 2 Proportion of fractional vegetation cover (FVC) persistence grades from 2000 to 2020 in Shaanxi Province %

Hurst 指数	持续性等级	陕西省	黄土高原区	关中平原区	秦巴山区
$H \leq 0.4$	强反持续性	32.69	26.84	19.15	42.55
$0.4 < H \leq 0.5$	弱反持续性	39.47	40.00	39.00	39.06
$0.5 < H \leq 0.6$	弱持续性	21.52	24.89	30.37	15.53
$H > 0.6$	强持续性	6.32	8.27	11.48	2.86

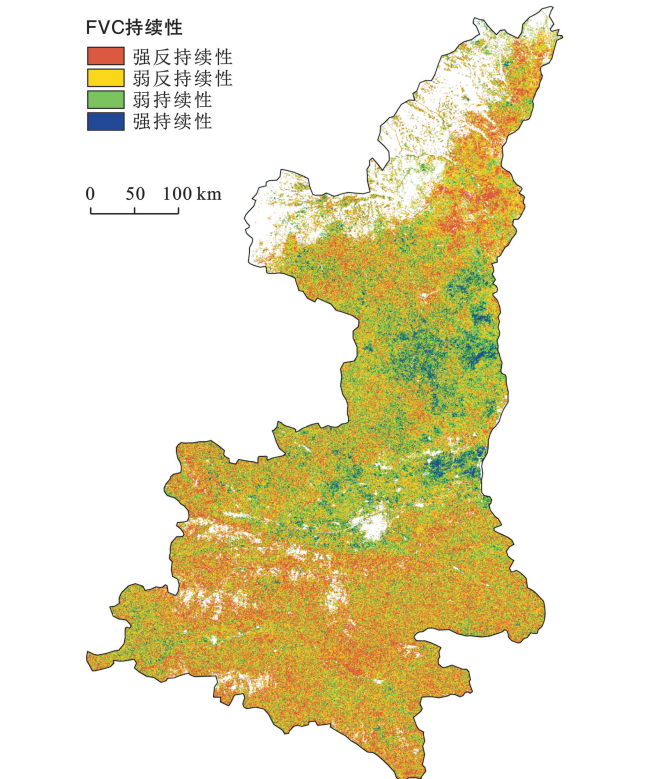


图 5 2000—2020 年陕西省植被覆盖度 (FVC) 持续性空间分布  
Fig.5 Spatial distribution of fractional vegetation cover (FVC) persistence in Shaanxi Province from 2000 to 2020

2.3 陕西省植被覆盖变化持续性分析

为进一步明确陕西省植被覆盖不同变化类型的持续性,将趋势分析结果与 Hurst 指数分析结果耦合,并统计了不同变化等级的面积比例,结果如图 6 和表 3 所示。FVC 变化趋势持续性空间分布较为复杂,全省持续性改善比例大于持续性退化比例,城市密集地区以退化型为主。将轻微改善和轻微退化的视为趋于稳定的变化趋势。FVC 持续改善的比例较低,为 19.80%,其中,强持续性显著改善比例为 2.43%,主要分布于黄土高原东部和南部,弱持续性显著改善比例为 8.50%,多集中于黄土高原,秦巴山区也有零星分布。FVC 趋于稳定的比例为 12.01%,其中,轻微改善的地区占全省的比例较高,为 8.87%,分布于黄土高原中部和南部、关中平原东北部及秦巴山区;轻微退化的地区占全省的比例为 3.14%,集中于关中平原。FVC 持续退化的比例为 8.04%,其中,强持续性显著退化的地区占全省比例仅为 1.08%,弱持续性显著退化的地区占全省比例为 3.82%。黄土高原和秦巴山区的持续性改善面积均大于持续性退化面积,且均以弱持续性为主。黄土高原地区 FVC 持续改善区域面积所占比例为 27.83%,远高于其他地形区,其中,强持续性改善面积比例为 6.93%,多分布于黄土高原中部地区。秦巴山区持续

改善区域面积所占比例为13.68%，持续退化面积仅为4.70%。而关中平原则是持续性退化面积比例较大，为28.89%，多分布于城市周边地区。

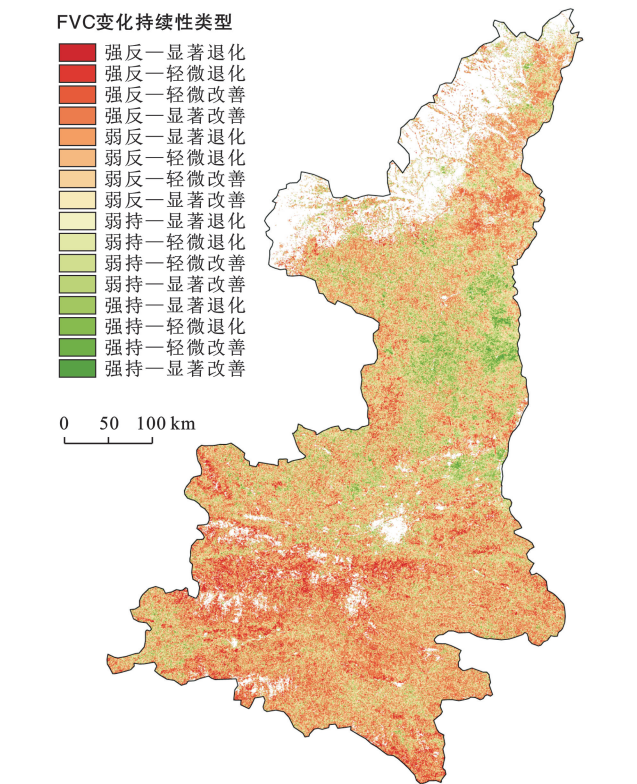


图 6 2000—2020 年陕西省植被覆盖度(FVC)变化持续性空间分布  
Fig.6 Spatial distribution of fractional vegeation cover (FVC) change persistence in Shaanxi Province from 2000 to 2020

### 2.4 陕西省植被恢复潜力值统计

总体而言,各潜力值计算结果均显示陕西省以林

地为主要植被类型的地区 FVC 值最高(图 7,表 4)。最大值统计结果显示,全省高植被覆盖面积占比可达88.10%,中等及更低等级的植被覆盖区域面积仅占全省面积的4.26%,只在黄土高原北部零散分布(图7a)。95%百分位的潜力值与最大潜力值相比恢复等级下降了很多,高植被覆盖区面积比例缩减至71.01%,表现为黄土高原北部和关中平原 FVC 恢复潜力值整体下降;中等植被覆盖区域面积增加最多,其面积比例增加至16.24%,表现为黄土高原西北部及东部地区恢复潜力值的降低,其分布区域与温带南部森林(草甸)草原带一致(图7b)。90%百分位的潜力值与95%百分位潜力值相比较低植被覆盖区面积显著扩大,其比例为11.95%,主要分布于黄土高原西北部;同时,低植被覆盖区面积大幅提升,其面积比例为1.18%,比95%百分位潜力值统计得到的面积比例增加了1.02%,表现为温带南部典型草原亚地带西北部的恢复潜力值降低(图7c)。FVC 恢复潜力的平均值统计得到:全省高、较高植被覆盖区面积比例分别为51.83%和9.83%,主要分布于黄土高原南部的子午岭林区及秦巴山区以林地为主要植被覆盖类型的区域;中等植被覆盖区面积比例为10.28%,主要分布于黄土高原中部和关中平原;较低植被覆盖区域面积比例为14.05%,主要分布于黄土高原东部及其与关中平原的接壤地带;低植被覆盖区面积比例为12.73%,主要分布于黄土高原北部的温带南部森林(草甸)草原带;极低植被覆盖区面积比例为1.28%,主要分布于黄土高原西北部,以草原为主要植被覆盖类型(图7d)。

表 3 2000—2020 年陕西省植被覆盖度(FVC)变化持续性面积比例统计  
Table 3 Proportion of fractional vegeation cover (FVC) change persistence trends from 2000 to 2020 in Shaanxi Province %

变化趋势		陕西省	黄土高原区	关中平原区	秦巴山区
强反持续性	显著退化	5.72	2.76	5.00	8.93
	轻微退化	1.62	0.44	4.96	1.83
	轻微改善	13.05	7.26	5.63	21.10
	显著改善	12.29	16.39	3.56	10.70
弱反持续性	显著退化	6.85	4.83	11.23	7.60
	轻微退化	3.03	0.84	13.05	2.31
	轻微改善	13.65	11.57	9.18	17.07
	显著改善	15.95	22.76	5.55	12.08
弱持续性	显著退化	3.82	3.39	8.82	2.80
	轻微退化	2.27	0.60	11.93	1.14
	轻微改善	6.92	7.82	6.13	6.25
	显著改善	8.50	13.08	3.48	5.34
强持续性	显著退化	1.08	1.11	2.99	0.49
	轻微退化	0.87	0.22	5.15	0.27
	轻微改善	1.95	2.73	2.28	1.06
	显著改善	2.43	4.20	1.06	1.03

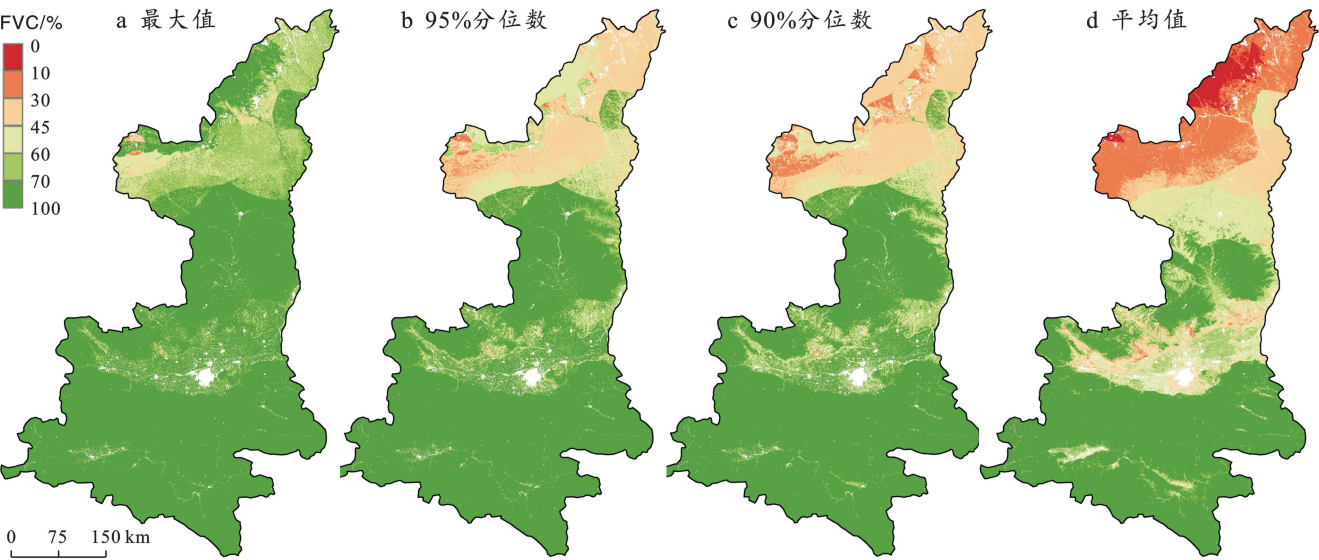


图 7 陕西省植被覆盖度(FVC)恢复潜力值空间分布

Fig.7 Spatial variation of fractional vegetation cover (FVC) recovery potential in Shaanxi Province

表 4 陕西省植被恢复潜力面积比例统计

Table 4 Proportion of vegetation recovery potential in Shaanxi Province

植被覆盖恢复潜力	最大值	95%百分位潜力值	90%百分位潜力值	平均值
极低	0.00%	0.12%	0.12%	1.28%
低	0.08%	0.31%	1.18%	12.73%
较低	0.41%	5.09%	11.95%	14.05%
中等	3.77%	16.24%	11.73%	10.28%
较高	7.64%	7.23%	6.87%	9.83%
高	88.10%	71.01%	68.15%	51.83%

2.5 陕西省植被恢复潜力预测

陕西省 FVC 恢复潜力指数越大的区域面积比例越小,潜力指数大于 0.7 的区域面积比例为 7.44%,集中分布于黄土高原西北部及其与关中平原的接壤地带;潜力指数介于 0.5~0.7 的区域面积比例为 7.23%,在黄土高原北部、南部及关中平原城镇周边零散分布;潜力指数介于 0.1~0.5 的区域面积比例达 40.68%;潜力指数小于 0.1 的区域面积比例高达 44.65%,集中分布区与黄土高原的子午岭林区和秦巴山区(图 8)。在 3 个地形区中,黄土高原的 FVC 具有较大的恢复空间,潜力指数大于 0.5 的区域面积比例为 24.26%,其中潜力指数大于 0.9 的区域面积比例为 6.58%。关中平原的 FVC 恢复空间较小,潜力指数大于 0.5 的区域面积比例为 23.56%,而潜力指数小于 0.2 的区域面积比例可达 40.92%。秦巴山区 FVC 基本保持稳定,恢复空间极小,潜力指数大于 0.5 的区域面积比例仅为 0.84%,而潜力值小于 0.1,0.1~0.2 的区域面积比例高达 74.30%和 17.89%(表 5)。

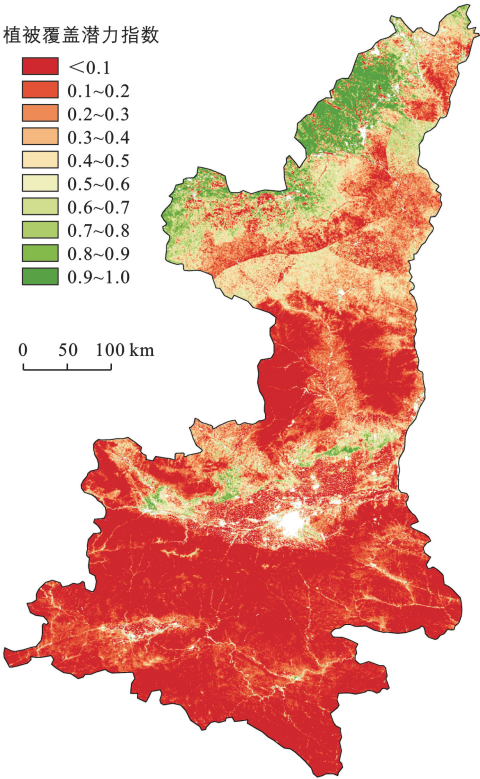


图 8 陕西省植被恢复指数空间分布

Fig.8 Spatial distribution of vegetation recovery index in Shaanxi Province

3 讨论

20 世纪 70 年代以来国家逐步开展的三北防护林建设、退耕还林(还草)工程和天然林保护工程等生态恢复工程,使陕西省植被覆盖整体提高 [28],本研究监测到 2000—2020 年陕西省 FVC 值波动上升,74.58%的地区呈现改善的趋势的结果也证明了植被

恢复措施确实是改善植被覆盖的有效途径<sup>[29]</sup>。但仅 19.80% 的 FVC 呈现持续改善及 8.04% 的 FVC 持续退化的结果显示也表明陕西省植被恢复的增长速度趋于放缓,持续改善能力已经较低,植被覆盖有趋于平稳的趋势。李登科等<sup>[30]</sup>也发现陕西省植被覆盖度在 2012 年达到最大值后在高位波动,植被覆盖度与环境资源容量达到了基本平衡。张斯源等<sup>[31]</sup>的研究结果也表明陕西省的生态系统较为脆弱,城镇化和人口密度增长过快导致生态胁迫加剧,使得生态系统超载,生态系统压力加大。由此表明相关生态恢复工程在取得植被覆盖明显提高的效益的同时,应关注植被覆盖改善的持续性,适时调整植被恢复工程措施,关注局部地形地貌对于水热条件分配的影响,根据气候和地形制定因地制宜的树、草种类,提高生态恢复措施的效益。此外,研究发现黄土高原西北部地区及其与关中平原的接壤处植被覆盖恢复潜力较大。这些区域目前植被覆盖较低,近年来中国政府加大了对黄土高原地区的生态保护力度,为植被恢复提供了有力的支持。同时,一些现代农业技术手段,诸如水源调控、土地改良等也为植被恢复提供了技术保障。

表 5 陕西省植被恢复指数面积比例统计  
Table 5 Statistics of area proportion of vegetation restoration potential index in Shaanxi Province %

植被恢复潜力指数	陕西省	黄土高原区	关中平原区	秦巴山区
<0.1	44.65	24.35	24.57	74.30
0.1~0.2	15.84	14.01	16.35	17.89
0.2~0.3	10.52	14.53	14.00	4.79
0.3~0.4	8.29	13.13	11.83	1.55
0.4~0.5	6.03	9.72	9.69	0.63
0.5~0.6	4.24	6.86	7.20	0.33
0.6~0.7	2.99	4.74	5.61	0.21
0.7~0.8	2.18	3.33	4.66	0.15
0.8~0.9	1.79	2.75	3.85	0.09
0.9~1.0	3.47	6.58	2.24	0.06

秦巴山区以天然林为主,植被覆盖较高,生态系统稳定性强,加之受人类活动影响较小,长期以来植被覆盖趋于稳定,几乎没有植被恢复的空间。因此,针对该地区的生态建设应以保护为主,加强监测和管理,保护植被的健康和稳定。研究期内,关中平原植被覆盖出现负增长趋势,且植被覆盖提升潜力有限,主要是由于该区土地利用以农业为主,农业生产受人为活动和季节影响明显,且近些年农地非粮化明显<sup>[32]</sup>,同时由于该区是陕西省的政治文化中心,城市扩建占用农地严重,今后应当提高农业土地利用,控制农地转为建设用地的规模。2000—2020 年黄土高原植被覆盖显著增加,显著改善面积比例可达

50.03%,这也凸显了植被恢复工程在区域生态建设中的作用,而且选取 95%分位数进行潜力预测时,黄土高原西北部及其于关中平原的接壤处植被覆盖恢复潜力较大,由此表明地形部位对于植被恢复具有重要影响,因此黄土高原区持续提高植被覆盖的重要途径尽管是继续实施植被恢复工程,但水热条件受到地形的影响显著,应根据地形和热量及水分条件选择适宜的植被种类以实现植被覆盖的持续提高。

4 结论

(1) 陕西省 FVC 趋于改善的区域远大于趋于退化的区域,其中黄土高原北部植被覆盖最差但改善最为显著,秦巴山区植被覆盖略有增加,而关中平原区植被覆盖略有下降。

(2) FVC 变化以弱反持续性为主,总体呈稳定发展趋势,黄土高原和秦巴山区的持续性改善面积均大于持续性退化面积,关中平原则是持续性退化面积比例较大。

(3) 不同地区和植被覆盖类型的 FVC 恢复潜力有很大差异。恢复潜力较高的区域集中于黄土高原西北部地区及其与关中平原的接壤地带;关中平原作为城市密集区以退化型为主要变化类型;以林地为主要植被覆盖类型的黄土高原的子午岭林区和秦巴山区植被恢复空间较小,保持稳定的发展趋势。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 邓元杰,姚顺波,侯孟阳,等.退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响:以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J].自然资源学报,2020,35(4):826-844.  
Deng Yuanjie, Yao Shunbo, Hou Mengyang, et al. Assessing the effects of the Green for Grain Program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: A case study of Zichang County in hilly and gully region of Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2020,35(4):826-844.

[2] Feng Dingrao, Wang Jinman, Fu Meichen, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of vegetation cover in the ecologically fragile areas of China from 2000 to 2015: a case study in Shaanxi Province [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019,26(28): 28977-28992.

[3] Wang Guangyu, Innes J L, Lei Jiafu, et al. China's forestry reforms [J]. Science, 2007,318(5856):1556-1557.

[4] Wang Yunqiang, Shao Ming'an, Liu Zhipeng, et al. Investigation of factors controlling the regional-scale distribution of dried soil layers under forestland on the loess plateau, China [J]. Surveys in Geophysics, 2012, 33

- (2):311-330.
- [5] 庞国伟,山琳昕,杨勤科,等.陕西省不同地貌类型区植被覆盖度时空变化特征及其影响因素[J].长江科学院院报, 2021,38(3):51-58.
- Pang Guowei, Shan Linxin, Yang Qinke, et al. Vegetation coverage in different landforms of Shaanxi Province: spatial and temporal variations and influencing factors [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021,38(3):51-58.
- [6] Cai Yunfei, Zhang Fei, Duan Pan, et al. Vegetation cover changes in China induced by ecological restoration-protection projects and land-use changes from 2000 to 2020 [J]. Catena, 2022,217:106530.
- [7] Brandt M, Rasmussen K, Peñuelas J, et al. Human population growth offsets climate-driven increase in woody vegetation in Sub-Saharan Africa [J]. Nature Ecology & Evolution, 2017,1(4):0081.
- [8] Jiang Meichen, He Yuexin, Song Conghe, et al. Disaggregating climatic and anthropogenic influences on vegetation changes in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 786: 147574.
- [9] 崔凤娇,邵锋,齐锋,等.植被对城市热岛效应影响的研究进展[J].浙江农林大学学报, 2020,37(1):171-181.
- Cui Fengjiao, Shao Feng, Qi Feng, et al. Research advances in the influence of vegetation on urban heat island effect [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2020, 37(1):171-181.
- [10] 黄健熙,吴炳方,曾源,等.水平和垂直尺度乔、灌、草覆盖度遥感提取研究进展[J].地球科学进展, 2005,20(8):871-881.
- Huang Jianxi, Wu Bingfang, Zeng Yuan, et al. Review of tree, shrub, grass cover of horizontal and vertical scale retrieval from remotely sensed data [J]. Advance in Earth Sciences, 2005,20(8):871-881.
- [11] Lu Ang, Tian Peng, Mu Xingmin, et al. Fuzzy logic modeling of land degradation in a loess plateau watershed, China [J]. Remote Sensing, 2022,14(19):4779.
- [12] Qi J, Marsett R C, Moran M S, et al. Spatial and temporal dynamics of vegetation in the San Pedro River basin area [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105(1-3):55-68.
- [13] Wang Lixia, Yu Dongyang, Liu Zhao, et al. Study on NDVI changes in Weihe Watershed based on CA-Markov model [J]. Geological Journal, 2018,53:435-441.
- [14] 易海杰,张晓萍,何亮,等.黄土高原不同地貌类型区植被恢复潜力及其土地利用变化[J].农业工程学报, 2022,38(18):255-263.
- Yi Haijie, Zhang Xiaoping, He Liang, et al. Vegetation restoration potential and land use change in different geomorphological areas of the Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(18):255-263.
- [15] Zhang Daojun, Xu Xin, Yao Shunbo, et al. A novel similar habitat potential model based on sliding-window technique for vegetation restoration potential mapping [J]. Land Degradation & Development, 2020,31(6): 760-772.
- [16] 高海东,庞国伟,李占斌,等.黄土高原植被恢复潜力研究[J].地理学报, 2017,72(5):863-874.
- Gao Haidong, Pang Guowei, Li Zhanbin, et al. Evaluating the potential of vegetation restoration in the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5): 863-874.
- [17] 钱娅. 2006—2015年江苏省植被覆盖度的演变趋势与预测研究[D]. 江苏南京:南京信息工程大学, 2021.
- Qian Ya. Evolution trend and prediction of vegetation coverage in Jiangsu Province from 2006 to 2015 [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing University of Information Science and Technology, 2021.
- [18] 吕振涛,李生宇,范敬龙,等.蒙古国植被自然恢复潜力[J].中国沙漠, 2021,41(5):192-201.
- Lv Zhentao, Li Shengyu, Fan Jinglong, et al. Natural restoration potential of vegetation in Mongolia [J]. Journal of Desert Research, 2021,41(5):192-201.
- [19] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.黄土高原植被变化与恢复潜力预测[J].水土保持学报, 2021,35(1):205-212.
- Zhao Guangju, Mu Xingmin, Tian Peng, et al. Prediction of vegetation variation and vegetation restoration potential in the loess plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):205-212.
- [20] 郭芬芬,范建容,严冬,等.基于像元二分模型的昌都县植被盖度遥感估算[J].中国水土保持, 2010(5):65-67.
- Guo Fenfen, Fan Jianrong, Yan Dong, et al. Remote sensing estimation of vegetation coverage in Changdu County based on pixel dichotomy model [J]. Soil and Water Conservation in China, 2010(5):65-67.
- [21] 王举凤.内蒙古草原植被覆盖度对气候变化的响应[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2020.
- Wang Jufeng. Response of photosynthetic vegetation coverage to climate change in Inner Mongolia grassland [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A& F University, 2020.
- [22] 陈学兄,毕如田,张小军,等.太原市城区植被覆盖变化地形分异效应[J].水土保持通报, 2020,40(5):299-309.
- Chen Xuexiong, Bi Rutian, Zhang Xiaojun, et al. Topographic differentiation effect on vegetation cover change in urban districts of Taiyuan city [J]. Bulletin of

- Soil and Water Conservation, 2020,40(5):299-309.
- [23] 严岳鸿,何祖霞,苑虎,等.坡向差异对广东古兜山自然保护区蕨类植物多样性的生态影响[J].生物多样性, 2011,19(1):41-47.
- Yan Yuehong, He Zuxia, Yuan Hu, et al. The ecological response of fern diversity to different slopes in Gudoushan Nature Reserve, Guangdong [J]. Biodiversity Science, 2011,19(1):41-47.
- [24] 朱红春,陈楠,刘海英,等.自 1:10000 比例尺 DEM 提取地形起伏度:以陕北黄土高原的实验为例[J].测绘科学, 2005,30(4):86-88.
- Zhu Hongchun, Chen Nan, Liu Haiying, et al. Research on the relief based on 1:10000 DEMs: A case study in the loess plateau of North Shaanxi Province [J]. Science of Surveying and Mapping, 2005,30(4):86-88.
- [25] 王佃来,刘文萍,黄心渊.基于 Sen+Mann-Kendall 的北京植被变化趋势分析[J].计算机工程与应用, 2013,49(5):13-17.
- Wang Dianlai, Liu Wenping, Huang Xinyuan. Trend analysis in vegetation cover in Beijing based on Sen+Mann-Kendall method [J]. Computer Engineering and Applications, 2013,49(5):13-17.
- [26] Ali R, Kuriqi A, Abubaker S R, et al. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method [J]. Water, 2019,11(9):1855.
- [27] 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.
- Yan Enping, Lin Hui, Dang Yongfeng, et al. The spatio-temporal changes of vegetation cover in Beijing-Tianjin sandstorm source control region during 2000—2012 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(17):5007-5020.
- [28] 刘迎春,王秋风,于贵瑞,等.黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力[J].生态学报, 2011,31(15):4277-4286.
- Liu Yingchun, Wang Qiufeng, Yu Guirui, et al. Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the grain for green project on China's hilly Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(15):4277-4286.
- [29] 成佩昆,胡守庚,孙涛,等.陕西省退耕还林工程对植被恢复的效应:基于 PCSE 修正的面板数据模型[J].干旱区研究, 2018,35(6):1477-1486.
- Cheng Peikun, Hu Shougeng, Sun Tao, et al. Effect of grain for green project on vegetation regeneration in Shaanxi Province: Based on PCSE panel data model [J]. Arid Zone Research, 2018,35(6):1477-1486.
- [30] 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 Dengke, Wang Zhao. 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.
- [31] 张斯源,樊逸飞,颜礼,等.基于长时序 MODIS 的陕西省近 20 年生态质量时空变化及其驱动力研究[J].水土保持学报, 2023,37(2):111-119.
- Zhang Siyuan, Fan Yifei, Yan Li, et al. Temporal and spatial variation and driving forces of eco-environmental quality in Shaanxi Province in recent 20 years based on long time series MODIS data [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(2):111-119.
- [32] 杜国明,李宁宁,张娜,等.全国耕地“非粮化”时空格局分析[J].东北农业大学学报(社会科学版), 2022,20(2):17-27.
- Du Guoming, Li Ningning, Zhang Na, et al. Analysis on the spatio-temporal pattern of non-grain cultivated land in China [J]. Journal of Northeast Agricultural University (Social Science Edition), 2022,20(2):17-27.