

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.05.037; CSTR:32311.14.rswc.2025.05.037.

员学锋, 陈蓓, 杨悦, 等. 植被覆盖对陕北黄土高原土地利用功能的约束效应[J]. 水土保持研究, 2025, 32(5): 288-297.

Yuan Xuefeng, Chen Bei, Yang Yue, et al. Constraint effect of vegetation coverage on land use functions of Loess Plateau in northern Shaanxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(5): 288-297.

# 植被覆盖对陕北黄土高原土地利用功能的约束效应

员学锋<sup>1,2</sup>, 陈蓓<sup>1,2</sup>, 杨悦<sup>1,2</sup>, 赵雨<sup>1,2</sup>, 安健吉<sup>1,2,3</sup>

(1. 长安大学 土地工程学院, 西安 710054;

2. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710054; 3. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** [目的] 明确植被覆盖与土地利用功能的相关关系和阈值效应, 为促进区域土地资源合理配置、国土空间格局优化、生态修复政策调整提供科学依据。[方法] 采用归一化植被指数表征植被覆盖强度, 量化土地利用的生产、生活和生态功能, 借助斯皮尔曼秩相关系数和约束线法分析植被覆盖对土地利用功能的影响方式及影响阈值。[结果] 2000—2020 年归一化植被指数呈波动式上升态势, 93.29% 的区域植被覆盖明显改善, 退化区域不足 1%; 不同土地利用功能空间分异特征明显, 生产功能呈现北高南低的空间格局, 生活功能主要分布在各区县的中心城区, 生态功能表现为南高北低的特征, 3 种土地利用功能均值变化情况分别为 -24.19%, 74.70% 和 25.96%; 植被覆盖对生产功能的约束作用无明显阈值, 对生活功能和生态功能存在明显阈值, 且研究期间阈值逐渐增加至 0.415, 0.603。[结论] 陕北黄土高原应注重生产、生活、生态三者间的均衡发展, 适度规模推进生态工程建设, 结合各县域土地资源特点调整生态恢复管理政策。

**关键词:** 植被覆盖; 土地利用功能; 约束线; 陕北黄土高原

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)05-0288-10

## Constraint effect of vegetation coverage on land use functions of Loess Plateau in northern Shaanxi

Yuan Xuefeng<sup>1,2</sup>, Chen Bei<sup>1,2</sup>, Yang Yue<sup>1,2</sup>, Zhao Yu<sup>1,2</sup>, An Jianji<sup>1,2</sup>

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Land Reclamation Engineering, Xi'an 710054, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to elucidate the correlation between vegetation coverage (VC) and land use functions (LUFs), and identify the threshold effect of VC on LUFs. This will provide scientific foundation for facilitating the rational allocation of regional land resources, optimizing territorial spatial patterns, and adjusting ecological restoration policies. [Methods] The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used to characterize vegetation coverage intensity, and the production, living, and ecological functions of land use were quantified. The Spearman's rank correlation coefficient and the constraint line method were utilized to analyze the influencing patterns and thresholds of VC on LUFs. [Results] From 2000 to 2020, NDVI showed a fluctuating increasing trend, with VC significantly improving in 93.29% of the area and degrading in less than 1%. The spatial differentiation of different LUFs was evident. The production function showed a spatial pattern of higher values in the north and lower values in the south. The living function was mainly distributed in the central urban areas of the various districts and counties, and the ecological function displayed higher values in the south and lower values in the north. The variations in averages of the three land use functions were -24.19%, 74.70%, and 25.96%, respectively. VC showed no obvious threshold effect on the production function, but had significant

收稿日期: 2024-12-16

修回日期: 2024-12-31

接受日期: 2025-01-13

资助项目: 国家自然科学基金项目 (4271210); 长安大学中央高校资助项目 (300102354204); 陕西省创新能力支撑计划创新团队项目 (2024RS-CXTD-55)

第一作者: 员学锋 (1977—), 男, 陕西延安人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事土地利用与评价研究。E-mail: zyxfyun@chd.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

thresholds for the living and ecological functions, which gradually increased to 0.415 and 0.603 during the study period. [Conclusion] The Loess Plateau in northern Shaanxi should achieve balanced development between production, living, and ecological functions, advance ecological engineering at appropriate scales, and adjust ecological restoration policies by combining the characteristics of land resources in each county.

**Keywords:** vegetation coverage; land use functions; constraint line; Loess Plateau in northern Shaanxi

土地利用功能(land use functions, LUFs)是指不同土地利用类型提供私人或公共产品和服务以满足人类生存和发展的需求的能力,其功能实现的有效性 与多元性是保障区域土地优化利用的重要途径<sup>[1]</sup>。随着城镇化和工业化进程加快,国土资源得到了充分开发和利用,但同时过度的人类活动和城乡建设用地扩张挤占了农业和生态空间,也使环境逐渐恶化<sup>[2-3]</sup>,尤其在黄土高原和西北干旱区等生态脆弱区生态问题愈加突出。我国于1999年陆续开展了一系列生态修复工程,旨在通过增加植被覆盖度改善区域生态环境。多项研究表明,生态修复工程实施区植被覆盖得到明显改善<sup>[4]</sup>,黄土高原土地利用结构发生显著变化<sup>[5]</sup>。然而,也有学者对生态工程实施给生态系统带来的长期影响提出质疑,认为过度的植树造林会加剧生态脆弱区的环境退化<sup>[6]</sup>、降低农牧业产值<sup>[7]</sup>、倒逼农村地区人口外流<sup>[8]</sup>,如何优化土地资源利用,平衡生产、生活和生态空间成为区域可持续发展亟需解决的问题之一。因此,评估植被覆盖对土地利用功能的影响,对于优化区域土地资源配 置、优化国土空间格局、调整生态修复政策具有重要的指导意义。

随着可持续发展理念在土地变化科学领域的拓展,土地利用功能研究已从多功能农业领域<sup>[9]</sup>、景观功能<sup>[10]</sup>、生态系统产品和服务等方面延伸到了环境、社会、经济可持续发展等多方面。目前,国内外学者在土地利用功能内涵与分类<sup>[11]</sup>、研究方法 及评价体系<sup>[12]</sup>、驱动因子与功能分区等<sup>[13]</sup>方面展开了许多研究,研究单元主要集中于市域、县域等行政区域的耕地、林地、城乡建设用地等单一土地利用功能形态方面。人类对土地资源利用的多元化使得各功能区的土地利用功能不尽相同,而植被覆盖通过影响农业产业结构、经济和社会效益、粮食产量、土壤保持、水源涵养等方面,进而影响区域土地利用功能分布格局。近年来,生态修复工程提出了因地制宜、合理安排退耕还林规模和进度的新要求,而已有研究多集中于探讨单一土地利用要素对植被覆盖的响应和植被覆盖对生态系统服务的阈值效应<sup>[14]</sup>和土地利用方式对植被覆盖的响应,缺少植被覆盖对多种土地利用功能影响方式的研究,难以全面反映生态修复工程对区域综合土地利用功能的影响。因此科学分析植被覆盖对土地利用功能影响的阈值效应,对于促进区域国土空

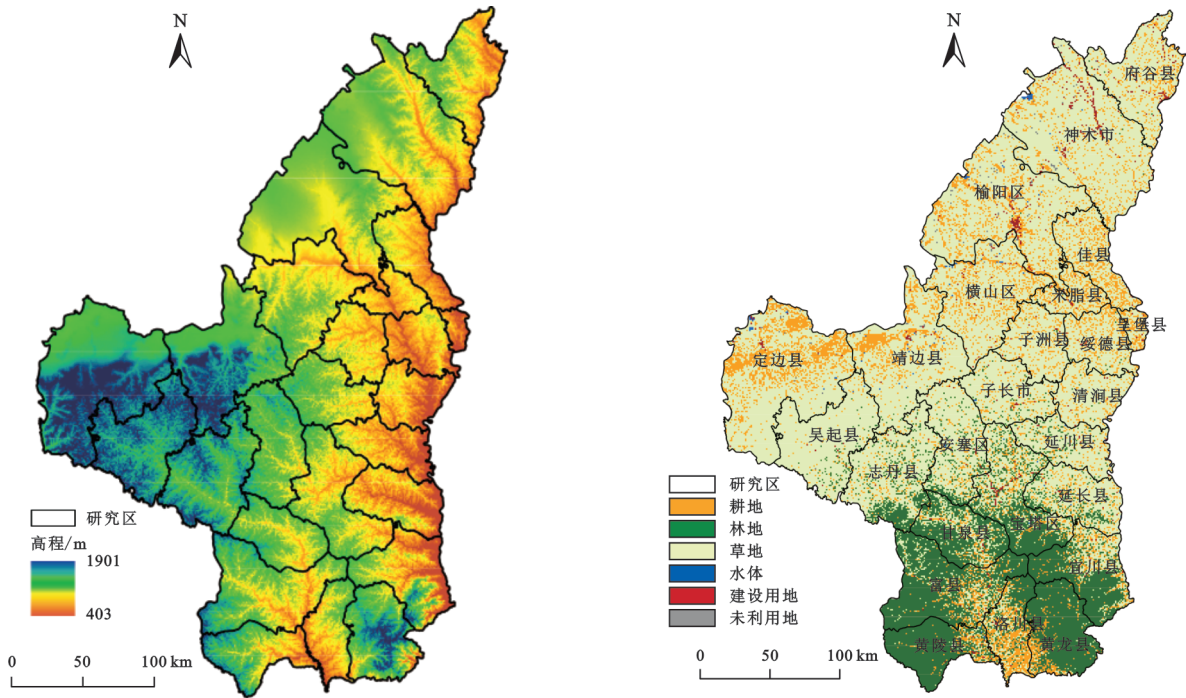
间优化和区域生态管理具有重要意义。

作为生态修复工程的重点实施区域,陕北黄土高原受自然条件和人类活动共同影响,是典型的生态脆弱区。工程实施以来,农业产业结构、居民生活保障和区域生态环境发生明显变化,陕北黄土高原作为“两屏三带”生态安全格局的重要组成部分,对国家生态安全具有重要影响。基于此,本文以陕北黄土高原作为研究区域,量化不同阶段植被覆盖情况,分析不同植被覆盖情况下区域土地利用功能时空格局,探究植被覆盖变化与土地利用功能的相关性,识别植被覆盖变化对土地利用功能影响的阈值效应,以期为陕北黄土高原地区合理配置土地资源、优化生态管理政策、实现可持续发展提供科学参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

陕北黄土高原指陕西省北部地区(图1),位于黄河以北、黄土高原的中心部分(35°—40°N, 107°—112°E),行政区划包括延安市和榆林市,下辖榆阳、神木、黄陵和宝塔等25个县(区、市),总面积约92 521.4 km<sup>2</sup>,年降水量250~440 mm,属于暖温带大陆性季风半湿润气候和温带半干旱气候过渡区。地势西北高、东南低,西北部地处水资源匮乏、地表裸露度高的毛乌素沙漠南部风沙草滩区,北部和中部位于土质疏松、地形破碎的黄土高原丘陵沟壑区,南部是国家天然林自然保护区,土地利用类型以耕地、林地和草地为主,粮食产量和畜产品产量均位居陕西省前列。近年来依靠煤炭等矿产资源大力发展能源化工产业,休闲旅游等新兴服务业也逐渐涌现,使得陕北黄土高原二、三产业经济增速明显,中心城区人口密度逐渐增大。由于自然本底条件薄弱,加之长期以来人们对土地资源的不合理利用,加剧了该地区生态环境恶化,生态问题和人地矛盾愈加突出。经过实施生态修复工程,陕北黄土高原地区植被覆盖条件显著恢复,生态环境明显改善。与此同时,当地农业产业结构和居民收入构成发生了调整,随着经济飞速发展,居民对生产、生活和生态的需求也不断提高。因此以陕北黄土高原为研究区,探讨植被覆盖对当地土地利用功能的影响具有典型性和代表性。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2022)1873号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区地理位置及行政单元概况

Fig. 1 Overview of geographic location and administrative divisions of the study area

1.2 数据来源及处理

本研究用到的空间数据和社会经济数据见表 1。为便于计算,所有数据统一行政区边界(2022年)和坐标系(Krasovsky\_1940\_Albers),在 ArcGIS Pro 软件中创建 1 km×1 km 的网格,最终得到 81 241 个格网作为空间分析单元,将原始栅格数据的分辨率重采样为 1 km×1 km,以便在该网格下实现各项功能指标的空间化表达。

1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖量化 归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)可客观反映植被长势和覆盖程度,所以本文采用一元线性回归方程反映 2000—2020 年 NDVI 的变化趋势,结合 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验探索 2000—2020 年长时间序列 NDVI 的空间变化特征<sup>[16]</sup>。

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

式中:Slope 为 NDVI 波动的斜率;*i* 为年份;*n* 为时间跨度; $\overline{\text{NDVI}}_i$  为第 *i* 年的 NDVI 值。Slope>0,表示植被覆盖增加,Slope<0,则反之。

$$S_{\text{NDVI}} = \text{Median} \left( \frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i} \right) 2000 \leq i < j \leq 2020 \quad (2)$$

式中: $S_{\text{NDVI}}$  表示 NDVI 的斜率估计趋势度, $S_{\text{NDVI}}>0$

时,表明 NDVI 时空变化呈现增长趋势,反之则呈现退化趋势。

$$\text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) = \begin{cases} 1 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0 \\ 0 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0 \\ -1 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$s(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) \quad (5)$$

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

式中: $s(S)$  为方差;*S* 为正态分布;*Z* 检验统计量,用于显著性检验; $\text{NDVI}_j$  和  $\text{NDVI}_i$  表示 *j* 年和 *i* 年的 NDVI 值;*n* 为时间;sgn 是符号函数;*Z* 的取值范围是(-1, 1),一般取显著性水平  $\alpha$  的值为 0.05。

1.3.2 土地利用功能指标体系构建 土地利用功能是土地的自然属性和人类生活需求融合发展的产物,不同的土地利用功能承载着不同的人类需求。本研究结合国内外学者的研究成果和陕北黄土高原土地利用特征,基于国土空间发展目标将陕北黄土高原土地利用功能划分为生产功能(Production Function, PF)、生活功能(Living Function, LF)和生态功能(Ecological Function, EF),并对研究区土地利用功能进一步细分

并选取相应的评价指标,生产功能选取粮食生产和畜产品供给两项指标(权重分别为 0.225,0.088),生活功能选取人口密度和非农经济两项指标(权重分别为

0.167,0.249),生态功能选取净初级生产力、土壤保持和产水量三项指标(权重分别为 0.065,0.116,0.090)。权重使用熵权法计算,各指标计算方法如下。

表 1 数据来源及说明

Table 1 Data sources and descriptions

数据类型	数据来源	空间分辨率
土地利用数据	杨杰等 <sup>[15]</sup> 开发的 CLCD 数据集( <a href="https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810">https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810</a> )	栅格数据(30 m)
夜间灯光数据	国家地球系统科学数据中心( <a href="https://www.geodata.cn/">https://www.geodata.cn/</a> )	栅格数据(1 km)
人口数据	WorldPop 人口栅格数据数据集( <a href="https://www.worldpop.org/">https://www.worldpop.org/</a> )	栅格数据(100 m)
DEM 数据	地理空间数据云( <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a> )	栅格数据(30 m)
NDVI 数据	国家生态科学数据中心( <a href="http://www.nesdc.org.cn/">http://www.nesdc.org.cn/</a> )	栅格数据(1 km)
土壤数据	国家地球系统科学数据中心( <a href="http://www.geodata.cn/">http://www.geodata.cn/</a> )	1:1000000
气象数据	国家青藏高原科学数据中心( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> )	栅格数据(1 km)
行政区划数据	国家基础地理信息数据中心( <a href="https://ngcc.cn/ngcc/">https://ngcc.cn/ngcc/</a> )	面状矢量数据
社会经济数据	《中国县域统计年鉴》《陕西省统计年鉴》	属性数据(县级)

(1) 粮食生产。

$$FP_{ij} = \frac{NDVI_{ij}}{NDVI_i} \times FP_i \quad (7)$$

式中:FP<sub>ij</sub>为单位格网的粮食产量;*i*为区县;*j*为网格;NDVI<sub>ij</sub>为区县*i*在网格*j*上的 NDVI 值;NDVI<sub>*i*</sub>为*i*区县的 NDVI 总值;FP<sub>*i*</sub>为*i*区县的粮食总产量<sup>[17]</sup>。

(2) 畜产品供给。

$$LPS_{ij} = \frac{LPS_{ij}}{G_i} \times G_{ij} \quad (8)$$

式中:LPS<sub>ij</sub>为单位格网的畜产品供给;*i*为区县;*j*为网格;LPS<sub>ij</sub>为*i*区县在*j*网格上的畜产品值;*G<sub>i</sub>*为区县*i*草地的面积;*G<sub>ij</sub>*为*i*区县*j*网格上的草地面积<sup>[17]</sup>。

(3) 人口密度。

$$Pop_i = \frac{Pop_i}{Q_j} \times Q_j \quad (9)$$

式中:Pop<sub>*i*</sub>(万人/hm<sup>2</sup>)为网格*i*的人口密度;Pop<sub>*j*</sub>(万人)为区县*j*的总人口;*Q<sub>j</sub>*和*Q<sub>i</sub>*为区县*j*的第*i*个网格的灯光数<sup>[18]</sup>。

(4) 非农经济密度。

$$E_i = \frac{GDP2_j + GDP3_j}{NL_j} \times NL_i \quad (10)$$

式中:*E<sub>i</sub>*(万元/hm<sup>2</sup>)为网格*i*的非农经济密度;GDP2<sub>*j*</sub>(万元)和 GDP3<sub>*j*</sub>(万元)为*j*区县的二、三产业产值;NL<sub>*j*</sub>和 NL<sub>*i*</sub>为区县*j*和网格*i*的灯光数<sup>[18]</sup>。

(5) 净初级生产力。

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (11)$$

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times 0.5 \times FPAR(x, t)$$

$$\epsilon(x, t) = T\epsilon(x, t) \times W\epsilon(x, t)\epsilon_{max}$$

式中:NPP(gC/m<sup>2</sup>·a)为网格*x*在*t*时间的净初级生产力;太阳总辐射量(SOL)和光合有效辐射吸收比

例(FPAR)计算可得到光合有效辐射 APAR[MJ/(m<sup>2</sup>·a)]; $\epsilon$ (gC/MJ<sup>2</sup>)为 APAR 转化为有机碳的效率,通过  $\epsilon_{max}$  最大光能利用率、*T $\epsilon$*  温度胁迫和 *W $\epsilon$*  水分胁迫估算获取<sup>[17]</sup>。

(6) 土壤保持。

$$SC = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (12)$$

式中:SC 为土壤保持量(t/hm<sup>2</sup>);*R* 为降雨侵蚀力指标(MJ·mm/hm<sup>2</sup>·h);*K* 为土壤可侵蚀性因子;*L* 为坡长因子[t·hm<sup>2</sup>·h/(hm<sup>2</sup>·MJ·mm)];*S* 为坡度因子;*C* 为植被覆盖因子;*P* 为管理因子<sup>[17]</sup>

(7) 产水量。

$$Y(x) = \left[ 1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right] \times P(x) \quad (13)$$

式中:*Y(x)*为网格*x*的产水(mm);AET(*x*)为网格*x*的蒸散量(mm);*P(x)*为网格*x*的年降水量(mm)<sup>[17]</sup>。

### 1.3.3 植被覆盖对土地利用功能影响测度

(1) 斯皮尔曼秩相关系数。斯皮尔曼秩相关(Spearman)是分析不同变量之间相关性的常用方法,可以评估不同变量之间的响应程度。斯皮尔曼秩相关基于排序位次进行计算,且对异常值不敏感,适用于计算非线性关系数据之间的相关性<sup>[19]</sup>。本文选择 Spearman 秩相关系数测算植被覆盖和土地利用功能之间的相关性。

$$r_s(X_i, Y_i) = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (S_i - W_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (14)$$

式中:秩相关系数  $r_s(X_i, Y_i)$  的取值范围为[-1, 1];*S<sub>i</sub>* 指序列等级;*W<sub>i</sub>* 为 *Y<sub>i</sub>* 的秩次,*n* 是观测值的个数。

(2) 约束线法。约束线法在刻画多因素驱动的复杂关系时,能够有效排除限制变量以外的其他因

素对响应变量的干扰,以分析限制变量对响应变量的约束效应及阈值<sup>[20]</sup>。本研究使用基于分位数分割的约束线法:首先将NDVI变化值作为限制变量( $x$ 值),土地利用各功能变化值作为响应变量( $y$ 值)并绘制散点图,在R Studio软件中将 $x$ 轴的值域平均分为100份,选取每份中 $y$ 值的99.9%分位数作为边界点,用提取到的边界点进行多项式函数最优拟合,得到拟合优度 $R^2$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被覆盖的时空变化情况

采用Slope趋势法分析陕北黄土高原2000—2020年NDVI均值的变化情况(图2)。结果表明,2000—2020年陕北黄土高原植被覆盖呈现波动上升的趋势,2000—2010年NDVI均值增长平缓,由0.413增长到0.519,涨幅25.62%;2010—2020年NDVI均值年际差异较大,由0.519增长到0.632,涨幅21.77%。研究期间NDVI增长52.97%,研究区植被覆盖度有所改善。

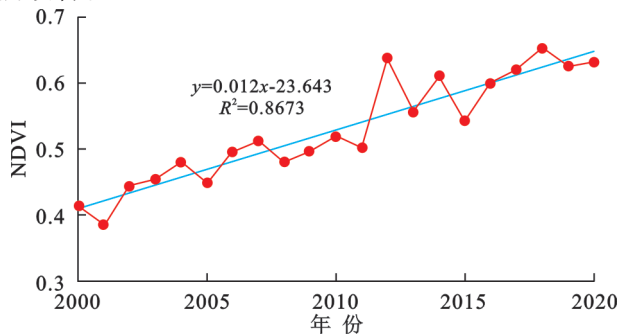


图2 2000—2020年平均NDVI变化趋势

Fig. 2 Variation trend of average NDVI (2000—2020)

由图3可以看出,2000年,NDVI值小于0.4的区域占比61.26%,连片分布于榆林市和延安市北部,至2020年,该面积已缩减至7.67%,零散分布于毛乌素沙漠地区的神木市、榆阳区 and 定边县等区县。NDVI值高于0.6的区域范围逐渐向北扩张,面积由2000年的17.64%增长至2020年的60.19%。总体而言,陕北黄土高原NDVI分布呈现出南高北低的空间分布特征,植被覆盖情况较差的区域面积明显缩小。

进一步将Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall检验结合起来探究陕北黄土高原地区2000—2020年的NDVI时空变化情况(图4)。93.29%的区域植被覆盖明显改善,退化区域不足1%,零散且小范围分布于靖边县、榆阳区和宝塔区等地。总体来看,毛乌素沙漠地区和黄土高原丘陵沟壑区作为工程实施的首要区域,植被覆盖度显著提高,区域生态环境明显改善。

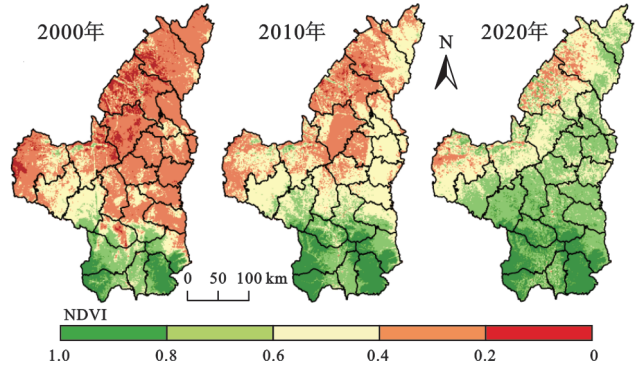


图3 2000—2020年NDVI空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of NDVI (2000—2020)

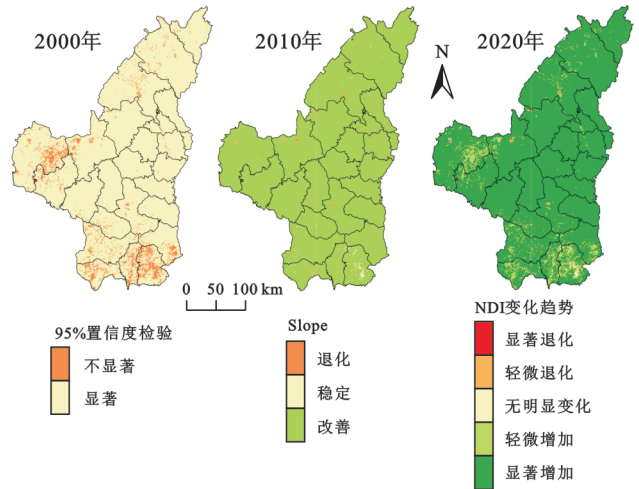


图4 2000—2020年NDVI时空变化趋势

Fig. 4 Spatiotemporal variation trends of NDVI (2000—2020)

### 2.2 土地利用功能时空变化情况

由图5可知,生产功能呈现出北高南低的格局,生产功能均值从2000年的0.024下降到2020年的0.018,降幅24.19%;低值区主要分布在黄陵县和黄陵县等县域的山区,随着退耕还林(草)工程的推进,以耕地和草地为主的吴起县和志丹县等县域生产功能下降明显。生活功能高值区以团块状分布在各区县中心城区及周边,生活功能均值从2000年的0.0012增长到2020年的0.0021,涨幅74.70%;以能源化工为主的府谷县和神木市生活功能扩张最为显著。生态功能呈现出由南向北逐渐递减的空间分布特征,生态功能均值从2000年的0.025增加到2020年的0.031,涨幅25.96%;高值区范围向北延伸,毛乌素沙漠生态功能低值区范围显著减少。

2000—2020年陕北黄土高原土地利用功能时空演化情况和变化值热点分布如图6所示。2000—2010年和2010—2020年生产功能下降的区域分别占比72.93%和52.22%,榆阳区、吴堡县和米脂县等耕地面积较多的县域生产功能表现为先减少后增加;冷热点分布与生产功能变化分布情况基本保持一致。

2000—2020年中心城区及周边的生活功能持续增加,榆林市和延安市北部生活功能增加显著高于南部山区;生活功能变化分布的热点区与北部中心城区高度重合。2000—2010年和2010—2020年分别有93.14%和85.85%的区域生态功能增加,生态功能显著增加的县域由志丹县、安塞区和子长市等草地区转移到佳县、吴堡县和绥德县等耕地区;生态功能变化冷点区集中分布于毛乌素沙漠地区,相较于2000—2010年,2010—2020年生态功能变化热点区面积扩大且片状分布于清涧县、延川县和绥德县等地。

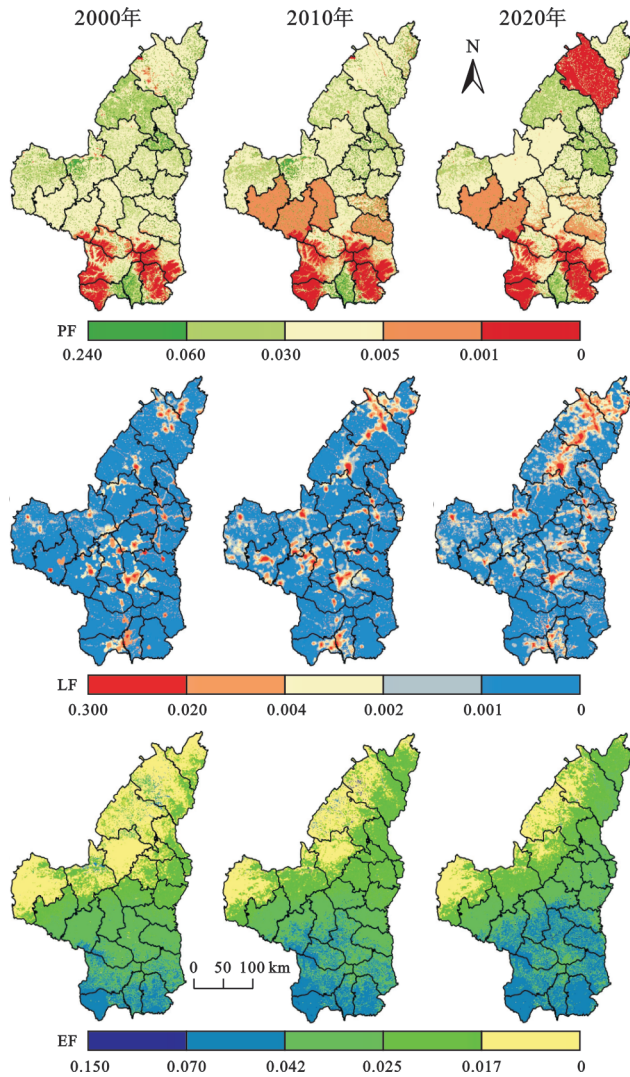


图5 2000—2020年土地利用功能时空分布

Fig. 5 Spatiotemporal distribution of land use functions (2000—2020)

### 2.3 植被覆盖与土地利用功能相关性测度

运用 Spearman 秩相关系数对2000年、2010年、2020年的NDVI和土地利用功能间的相关性进行分析(图7)。NDVI和土地利用功能两两间的相关性均通过了t检验, $p$ 值均小于0.01,即结果在1%水平上显著。2000—2020年,植被覆盖和生产功能之间的相关系数分别为 $-0.34$ 、 $-0.46$ 和 $-0.31$ ,表明NDVI

与生产功能之间为负相关,NDVI与生产功能之间的显著性先增强后减弱。2000—2020年,植被覆盖和生活功能之间的相关系数分别为 $-0.10$ 、 $-0.17$ 和 $-0.27$ ,表明NDVI与生活功能之间为负相关,且显著性持续增强。2000—2020年,植被覆盖和生态功能之间的相关系数分别为 $0.66$ 、 $0.77$ 、 $0.76$ ,表明NDVI与生态功能之间是正相关,显著性先增强后减弱。此外,各土地利用功能之间也呈现出不同的相关关系,生产功能和生活功能表现为正相关,显著性基本保持稳定;生产功能和生态功能之间是强负相关,显著性由增强变为减弱;生活功能和生态功能是微弱的负相关,显著性持续增强。

### 2.4 植被覆盖对土地利用功能变化的约束作用

采用约束线模型对2000—2020年NDVI值和各土地利用功能值进行模拟,可以识别研究时段内NDVI对土地利用功能的约束情况(图8)。

NDVI-PF的约束作用总体表现为随着NDVI增大,其对生产功能的约束作用逐渐增强。2000年,NDVI对生产功能的约束线表现为开口向上的抛物线( $R^2=0.5779$ ),散点几乎都分布在阈值左侧。2010年,NDVI对生产功能的约束线表现为开口向上的抛物线( $R^2=0.5783$ ),阈值左侧,NDVI对生产功能的约束作用逐渐减弱,在阈值点生产功能达到最大值,超过阈值之后,NDVI对生产功能的约束逐渐增强,生产功能值下降。2020年,NDVI对生产功能的约束线表现为斜率小于0的对数型曲线约束( $R^2=0.6115$ ),随着NDVI增大,其对生产功能的约束作用先减弱后保持不变。

NDVI-LF的约束作用大致表现为驼峰型,且在研究期间该约束关系逐渐明显,阈值逐渐增大。研究期间,NDVI对生活功能值的 $R^2$ 分别为 $0.4764$ 、 $0.5783$ 、 $0.5992$ 。阈值从 $0.197$ 增长到 $0.415$ ,2000年散点基本分布在阈值右侧,此后散点在阈值左右两侧均有分布,在阈值左侧,随着NDVI逐渐增大,其对生活功能的约束作用逐渐减弱,阈值点时生活功能达到最大值,此后随着NDVI继续增大,约束作用持续增强,生活功能值逐渐下降。

NDVI-EF的约束作用表现为驼峰型,在研究期间约束阈值逐渐增大。研究期间,NDVI对生态功能值的拟合优度 $R^2$ 分别为 $0.7329$ 、 $0.7433$ 、 $0.7106$ 。阈值从 $0.511$ 增长到 $0.603$ ,在阈值左侧,随着NDVI逐渐增大,其对生态功能的约束作用逐渐减弱,阈值点时生态功能达到最大值,此后随着NDVI继续增大,约束作用持续增强,生态功能值逐渐下降。

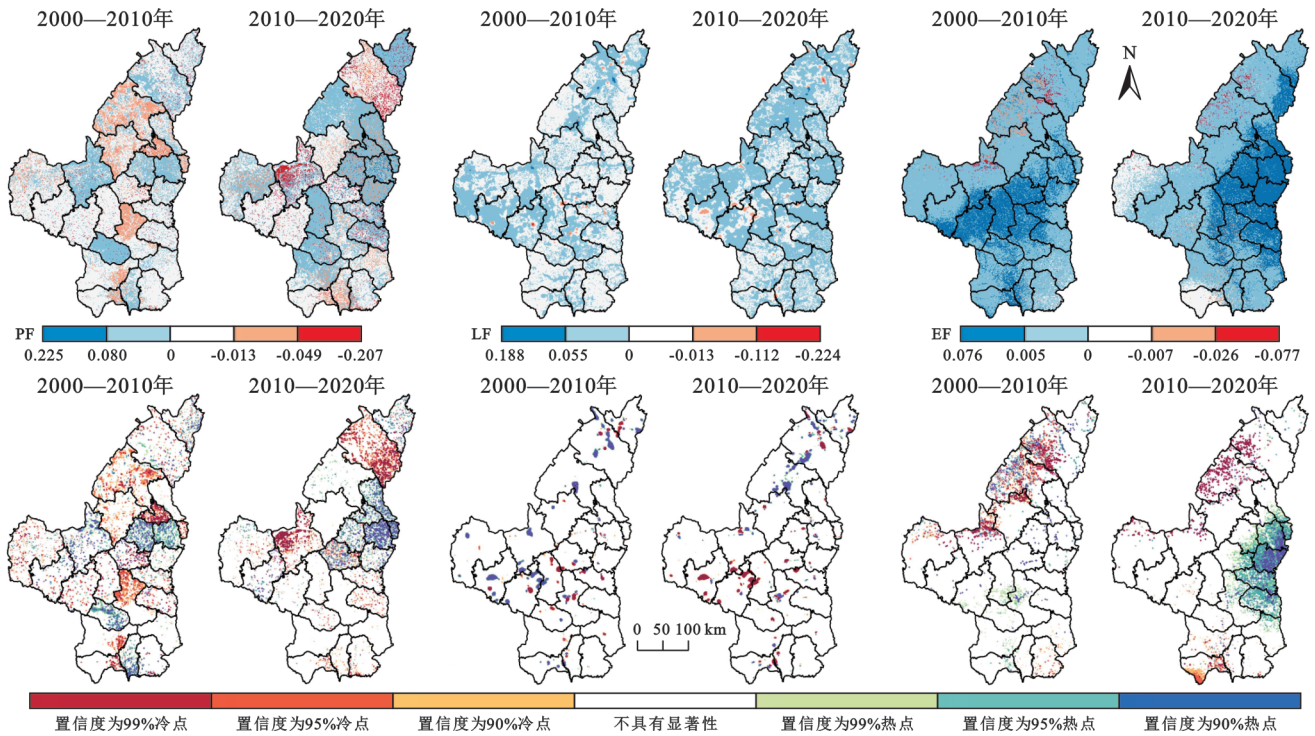


图 6 2000—2020 年土地利用功能变化情况及热点分布

Fig. 6 Variation and hotspot distribution of land use functions (2000—2020)

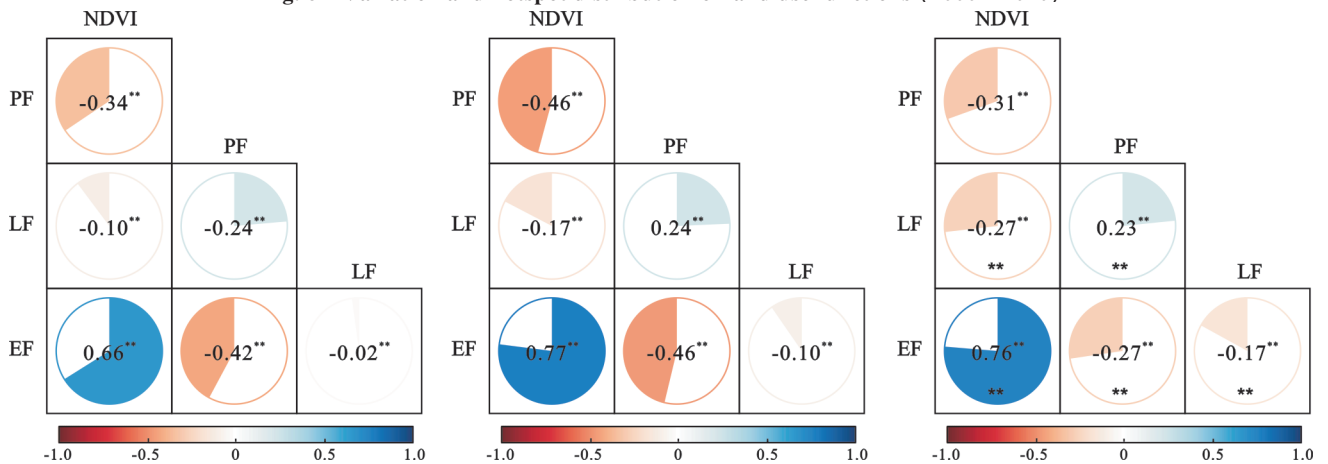


图 7 2000—2020 年 NDVI 与土地利用功能相关性测度

Fig. 7 Measurement of correlation between NDVI and land use functions (2000—2020)

### 3 讨论

#### 3.1 土地利用功能时空变化

2000—2020 年陕北黄土高原土地利用生产功能下降的区域主要分布在以耕地为主的县域,生活功能在以工业为主的神木市和府谷县增长最为显著,生态功能高值区由山区向北扩展。陕北黄土高原作为中国重要的能源和工业基地,在过去 20 年经济发展迅速,工业发展和交通建设促使城镇建设用地持续扩张,生态工程加速了耕地和未利用地向林地和草地转化,致使生产空间被生活空间和生态空间挤压<sup>[21]</sup>。此外,部分区县各土地利用功能之间呈现此消彼长的关系。如 2000—2010 年,榆阳区和米脂县等地生产功能

显著下降,但生态功能明显增加,生态功能增长区与生产功能减弱区高度重合;又如 2010—2020 年黄陵县的生产功能和生态功能略有下降,但生活功能轻微增长,考虑到新一轮生态修复工程兼顾生态恢复、经济发展和耕地保护,有必要合理配置土地资源,注重生产、生活、生态三者之间的均衡发展。

#### 3.2 植被覆盖对土地利用功能的约束效应

植被覆盖对土地利用生产功能的影响总体表现为随着植被覆盖增大,其对生产功能的约束作用增强。已有研究表明,退耕还林的实施强度与耕地减少趋于一致,工程实施初期粮食产量年际波动较大<sup>[22]</sup>,粮食生产的可持续性由自然资源系统主导逐渐转为社会经济系统主导<sup>[23]</sup>。考虑到农业生产对陕

北黄土高原地区居民生活的重要影响,有必要通过提高农业生产效率和质量、围栏轮牧等措施减弱高

植被覆盖对土地利用生产功能的约束作用,促进区域发展,保障粮食安全。

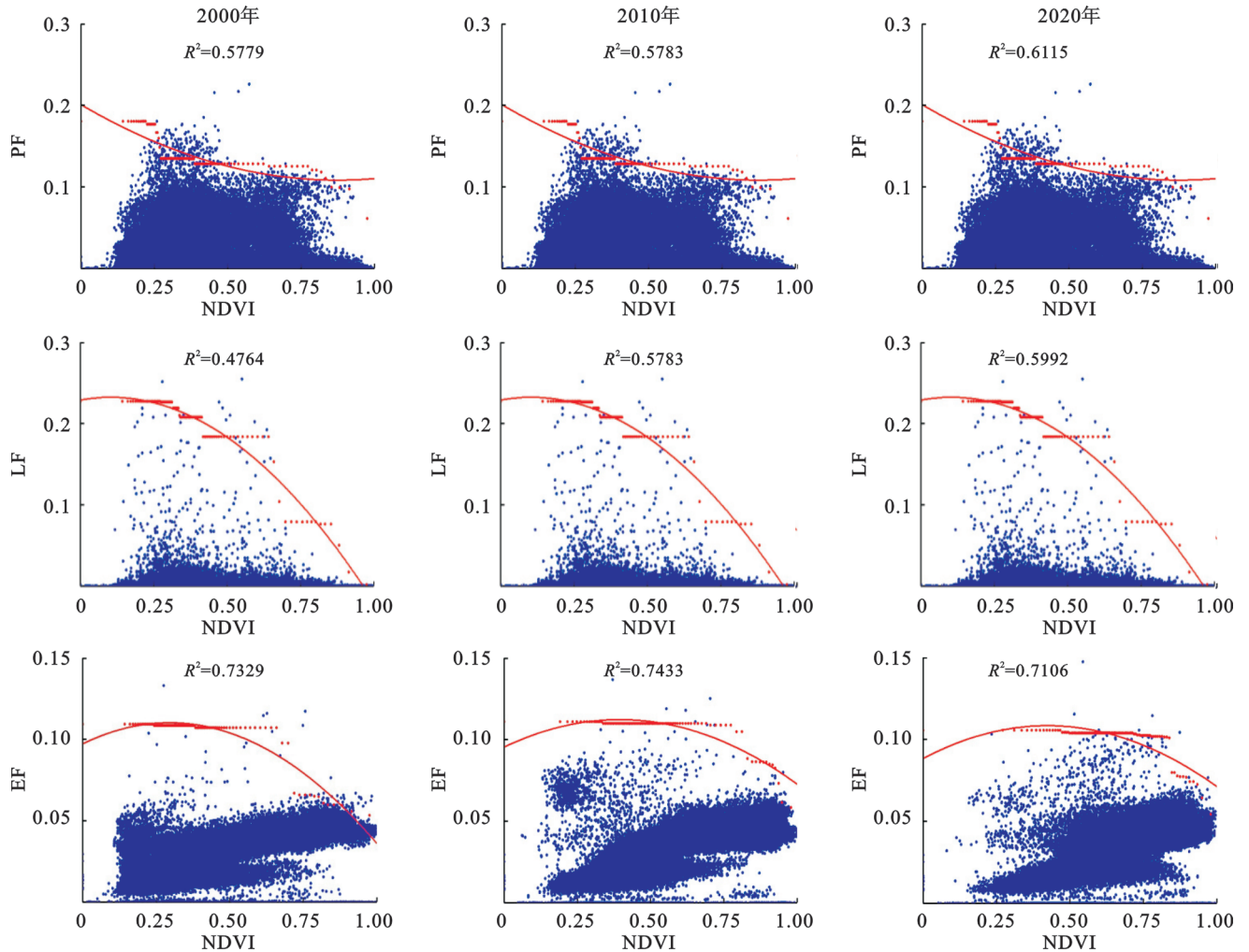


图8 2000—2020年NDVI与土地利用功能的约束关系

Fig. 8 Constraint relationship between NDVI and land use functions (2000—2020)

植被覆盖对生活功能的约束作用先减弱后增强。一定程度的植被覆盖有助于生活功能提升,但超过影响阈值,高植被覆盖对生活功能的约束作用逐渐增强。喻丹等<sup>[24]</sup>的研究表明在居民点聚集的区域实施生态工程会带来较大的经济损失,倒逼农村劳动力转移。此外,生态工程实施调整陕北黄土高原产业结构,使得二三产业的比重逐渐提高,区域发展对农业生产的依赖性降低。因此,有必要科学规划生态工程实施区域,减小生活空间和生态工程间的冲突,完善退耕区惠农政策以保障农户收益,保障生态工程的有效性和区域经济发展的可持续性。

植被覆盖对生态功能的影响表现为显著的非线性关系且存在明显阈值,明确阈值前后植被覆盖对生态功能的影响方式可为生态恢复目标的制定提供重要参考。张琨等的研究表明生态工程实施以后,黄土高原固碳能力显著提升<sup>[25]</sup>,此外,植被覆盖可改善土壤结构<sup>[2]</sup>,显著降低土壤侵蚀强度,适度的植被

覆盖对土壤保持能力具有正向作用<sup>[26-27]</sup>。但部分学者认为黄土高原中北部植被建设已经接近水资源植被承载的阈值<sup>[28]</sup>,高植被覆盖度会造成土壤干化,并最终导致植被生长衰退<sup>[29]</sup>,考虑植被生长对陕北黄土高原水资源的影响导致阈值前后生态功能存在差异,具有合理性。

### 3.3 不足与展望

本文通过计算各项土地利用功能二级指标,将其整合得到综合土地利用功能值,分析植被覆盖对土地利用功能的影响,并定量识别其影响阈值。受栅格数据可获取性影响,本研究的局限性主要有:(1)土地利用功能二级指标选取可能难以充分表征区域土地利用功能状况,可以考虑根据研究区实际情况增加二级指标数量,例如生活功能可增加交通保障、娱乐保障等;(2)约束线方法确定的阈值对于研究尺度具有依赖性<sup>[30]</sup>,阈值出现的条件和大小会随着空间尺度的不同而发生变化,未来可以考虑在

不同的研究单元和空间尺度进行对比研究。

## 4 结论

(1) 2000—2020年陕北黄土高原植被覆盖情况明显改善,研究区植被覆盖度提升52.97%,中、高覆盖度植被面积所占比例明显增加,植被覆盖结构显著好转,区域生态环境差异缩小。

(2) 2000—2020年陕北黄土高原土地利用功能时空变化显著。生产功能表现为北高南低,生活功能以中心城区为核心向周边延展,生态功能高值区由南向北扩张;生产功能、生活功能和生态功能的变化情况分别为-24.19%,74.7%和25.96%,区域土地利用功能整体水平有所上升。

(3) 植被覆盖与土地利用功能变化间具有相关性,但与不同土地利用功能间的关联程度存在差异。植被覆盖与生产功能和生活功能之间呈现负相关,且与生产功能间的负相关强于生活功能;与生态功能表现为显著正相关,相关系数大于0.65,其相关性先增后减。

(4) 植被覆盖对不同土地利用功能的约束效应存在差异,植被覆盖对生产功能存在不明显阈值,其约束效应持续增强,生产功能逐渐减弱;植被覆盖对生活功能和生产功能的影响阈值逐渐提高,分别达到0.415,0.603,超过阈值后,植被覆盖对生活功能和生态功能的促进作用逐渐弱化。

### 参考文献(References):

- [1] 曾凯豪,唐健,杨剩富.土地利用功能权衡协同关系及其驱动因子研究:以武汉市为例[J].中国土地科学,2024,38(6):66-77.  
Zeng K H, Tang J, Yang S F. Research on trade-offs and synergy relationship of land use functions and the driving factors: a case study in Wuhan[J]. China Land Science, 2024,38(6):66-77.
- [2] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. Ecological Indicators, 2015,51:117-126.
- [3] Zhao Z X, Dai E F. Vegetation cover dynamics and its constraint effect on ecosystem services on the Qinghai-Tibet Plateau under ecological restoration projects[J]. Journal of Environmental Management, 2024,356:120535.
- [4] 毛盛林,上官周平.近20年黄土高原土地利用/植被覆盖变化特征及其成因[J].水土保持研究,2022,29(5):213-219.  
Mao S L, Shanguan Z P. Characteristics and causes of land use/vegetation coverage of the Loess Plateau in the past 20 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(5):213-219.
- [5] 赵宏飞,何洪鸣,白春昱,等.黄土高原土地利用变化特征及其环境效应[J].中国土地科学,2018,32(7):49-57.  
Zhao H F, He H M, Bai C Y, et al. Spatial-temporal characteristics of land use change in the Loess Plateau and its environmental effects [J]. China Land Science, 2018,32(7):49-57.
- [6] Cao S X, Chen L, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: lessons in ecological restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2011,104(4):240-245.
- [7] Wu Z L, Dai X H, Li B, et al. Livelihood consequences of the Grain for Green Programme across regional and household scales: a case study in the Loess Plateau [J]. Land Use Policy, 2021,111:105746.
- [8] Zhang Q, Bista R, Bilsborrow R E, et al. Understanding the mediating role of labor out-migration in household income generation and distribution under a reforestation policy in rural China [J]. Journal of Environmental Management, 2023,345:118539.
- [9] 甄霖,曹淑艳,魏云洁,等.土地空间多功能利用:理论框架及实证研究[J].资源科学,2009,31(4):544-551.  
Zhen L, Cao S Y, Wei Y J, et al. Land use functions: conceptual framework and application for China [J]. Resources Science, 2009,31(4):544-551.
- [10] 彭建,吕慧玲,刘焱序,等.国内外多功能景观研究进展与展望[J].地球科学进展,2015,30(4):465-476.  
Peng J, Lü H L, Liu Y X, et al. International research progress and perspectives on multifunctional landscape [J]. Advances in Earth Science, 2015,30(4):465-476.
- [11] 彭焕智,周国华,崔树强,等.湘江流域土地利用多功能性评价及障碍因子识别[J].水土保持研究,2022,29(4):308-315.  
Peng H Z, Zhou G H, Cui S Q, et al. Evaluation and obstacle factor identification of multifunctionality of land use in Xiangjiang River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):308-315.
- [12] Fan Y T, Jin X B, Gan L, et al. Spatial identification and dynamic analysis of land use functions reveals distinct zones of multiple functions in Eastern China [J]. Science of the Total Environment, 2018,642:33-44.
- [13] 耿雨,梁小英,荔童,等.陕北黄土高原土地利用多功能时空分异及分区管理研究[J].西北大学学报:自然科学版,2022,52(1):32-42.  
Geng Y, Liang X Y, Li T, et al. The spatiotemporal differentiation and functional regionalization of land use functions in the Loess Plateau in Northern Shaanxi Province [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2022,52(1):32-42.
- [14] Liu Y M, Zhang C, Zeng H. Constraint effects among several key ecosystem service types and their influencing

- factors: a case study of the Pearl River Delta, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023,146:109883.
- [15] Yang J, Xie B, Zhang D, Tao W, 2021. Climate and yield ecosystem service in the Yellow River Basin, China. *Environment Earth Science*, 2021, 13(7), DOI: org/10.1007/s12665-020-09277-9.
- [16] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].*生态学报*,2013,33(24):7798-7806. Yuan L H, Jiang W G, Shen W M, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(24):7798-7806.
- [17] 朱从谋,苑韶峰.杭州市土地利用功能时空权衡特征及影响因素分析[J].*农业工程学报*,2022,38(6):264-273. Zhu C M, Yuan S F. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of trade-offs/synergies in land use functions in Hangzhou City, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(6):264-273.
- [18] 韩向娣,周艺,王世新,等.夜间灯光遥感数据的GDP空间化处理方法[J].*地球信息科学学报*,2012,14(1):128-136. Han X D, Zhou Y, Wang S X, et al. GDP spatialization in China based on nighttime imagery[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012,14(1):128-136.
- [19] Xiao J, Zhang Y F, Xu H J. Response of ecosystem service values to land use change, 2002—2021[J]. *Ecological Indicators*, 2024,160:111947.
- [20] 郝蕊芳,于德永,邬建国,等.约束线方法在生态学中的应用[J].*植物生态学报*,2016,40(10):1100-1109. Hao R F, Yu D Y, Wu J G, et al. Constraint line methods and the applications in ecology[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016,40(10):1100-1109.
- [21] 刘煦,黄明华,雷文韬.陕北黄土高原生态脆弱区土地利用时空演变[J].*中国农业资源与区划*,2023,44(3):47-57. Liu X, Huang M H, Lei W T. Spatiotemporal evolution of land use in ecologically fragile areas of the Loess Plateau in northern Shaanxi [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023,44(3):47-57.
- [22] 刘忠,李保国.退耕还林工程实施前后黄土高原地区粮食生产时空变化[J].*农业工程学报*,2012,28(11):1-8. Liu Z, Li B G. Spatial and temporal changes in grain production before and after implementation of Grain for Green project in Loess Plateau region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012,28(11):1-8.
- [23] 刘晓琳,卢晓妍,秦张璇,等.退耕还林还草背景下黄土高原粮食生产系统可持续性的时空演变[J].*农业工程学报*,2022,38(10):249-257. Liu X L, Lu X Y, Qin Z X, et al. Spatiotemporal changes of the sustainability of grain production system in the Loess Plateau based on Grain for Green Project [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(10):249-257.
- [24] 喻丹,董晓华,彭涛,等.基于减沙效益和经济效益的流域退耕还林方案优化[J].*农业工程学报*,2023,39(13):260-270. Yu D, Dong X H, Peng T, et al. Optimization of Grain for Green Program based on sediment reduction and economic benefits[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023,39(13):260-270.
- [25] Wang Y Y, Deng L, Wu G L, et al. Estimates of carbon storage in grassland ecosystems on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2018,164:23-31.
- [26] Deng L, Kim D G, Li M Y, et al. Land-use changes driven by 'Grain for Green' program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China [J]. *Global and Planetary Change*, 2019,177:101-115.
- [27] 高超,赵军,王玉纯,等.石羊河流域自然植被对生态系统服务的约束效应[J].*生态学报*,2020,40(9):2851-2862. Gao C, Zhao J, Wang Y C, et al. Study on the constraint effect of natural vegetation on ecosystem services in the Shiyang River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(9):2851-2862.
- [28] Sun Q H, Miao C Y, Duan Q Y, et al. Temperature and precipitation changes over the Loess Plateau between 1961 and 2011, based on high-density gauge observations[J]. *Global and Planetary Change*, 2015,132:1-10.
- [29] 傅伯杰,刘彦随,曹智,等.黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议[J].*中国科学院院刊*,2023,38(8):1110-1117. Fu B J, Liu Y S, Cao Z, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in Loess Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023,38(8):1110-1117.
- [30] Peng J, Tian L, Liu Y X, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: thresholds identification [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,607:706-714.