

DOI: 10.12401/j.nwg.2023103

# 榆林市生态系统固碳价值对林地系统结构的响应变化

张凡<sup>1</sup>, 田旭荣<sup>1</sup>, 薛彤<sup>1</sup>, 林永航<sup>1</sup>, 齐佳敏<sup>1</sup>, 张鹏飞<sup>2</sup>, 张茂省<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 712000; 2. 榆林市自然资源和规划局, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 将生态资源纳入经济体系统筹管理是环境可持续发展的必然要求。对于生态脆弱地区, 加强环境压力变化下的资源管理尤为重要。笔者从系统结构的角度理解生态系统固碳功能变化特征, 在榆林地区结合景观结构指数对固碳功能进行空间分析。2000~2020 年榆林市生态系统固碳服务价值持续增加, 2000~2010 年增长较快, 2010~2020 年增速减缓。在空间分布方面, 单位面积固碳价值从东南向西北递减, 东南部的增长速率也更快。工业活动是形成榆林市生态系统固碳价值西北、东南分划的主要因素, 东南部区县受生态系统结构变化的影响更强。研究表明, 在生态脆弱区实施生态建设和修复工程时, 应综合考虑生态系统的结构性以提高地区生态系统潜在的功能性。

**关键词:** 生态系统服务; 固碳价值; 系统结构; 生态脆弱区

中图分类号: P69; F205

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0051-07

## Response of Ecosystem Carbon Fixation Value to Forest System Structure in Yulin City

ZHANG Fan<sup>1</sup>, TIAN Xurong<sup>1</sup>, XUE Tong<sup>1</sup>, LIN Yonghang<sup>1</sup>, QI Jiamin<sup>1</sup>, ZHANG Pengfei<sup>2</sup>, ZHANG Maosheng<sup>1</sup>

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 712000, Shaanxi, China; 2. Yulin Bureau of Natural Resources and Planning, Yulin 719000, Shaanxi, China)

**Abstract:** It is an inevitable requirement of environmentally sustainable development to bring ecological resources into the overall management of the economic system. For ecologically fragile areas, it is particularly important to strengthen resource management under changing environmental pressures. This paper attempts to understand the change characteristics of carbon fixation function of ecosystem from the perspective of system structure, and carries out spatial analysis of carbon fixation function in Yulin area combined with landscape structure index. From 2000 to 2020, the carbon sequestration service value of Yulin's ecosystem continued to increase, and the growth rate was fast in 2000~2010 and slowed down in 2010~2020. In terms of spatial distribution, the carbon sequestration value per unit area s decreases from southeast to northwest, and the growth rate in southeast is also faster. Industrial activities are the main factor to form the northwest and southeast division of carbon sequestration value of Yulin, and the southeast counties are more affected by the change of ecosystem structure. The results of the study suggest that we should comprehensively consider the structure of the ecosystem to improve the potential functionality of the regional ecosystem when implementing ecological construction and restoration projects in the ecological fragile areas in the future.

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-05-23; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42173019)资助。

作者简介: 张凡(1978-), 女, 副教授, 博士, 从事生态评价研究工作。E-mail: zhangfan@xjtu.edu.cn。

**Keywords:** ecosystem services; carbon fixation value; system structure; ecologically fragile area

实现“双碳”目标是国家根据世界发展新形势作出的重大战略决策。如何着眼地区经济实际和资源环境禀赋,统筹产业结构与发展布局,推动高质量发展,是地方政府助力“双碳”目标的重要举措。生态系统是地球系统正常运转的基础。《2030年前碳达峰行动方案》对生态系统碳汇能力巩固提升提出明确要求。对区域生态资源赋存状态与变化进行准确评估,是构建“双碳”目标下国土空间开发与生态环境保护新格局的基础。基于自然的资本属性,根据生态系统及其固碳功能服务衡量经济价值(Costanza et al., 1997)的区域生态系统价值评估,不仅可以为从国家层面探索自然资源资产负债表提供技术支持,也是地区可持续发展目标导向政策优化调整的基础。

国内很多学者已对中国生态系统固碳服务价值开展评估研究。早期研究表明,中国陆地生态系统效益价值约为GDP的1.25倍(陈仲新等, 2000),固碳服务价值约为 $773.5 \times 10^9 \sim 3\ 619.2 \times 10^9$ 元(欧阳志云等, 1999)。后续研究进一步发现,生态系统的结构、状态和动态可以影响系统的功能和稳定性(Elmqvist et al., 2003; Cortina et al., 2006),从而影响生态系统固碳服务价值,因而不同生态系统类型间差异很大(谢高地等, 2015; 潘勇军等, 2018)。然而,当前研究对于地区生态系统结构变化的影响考虑较少,而这却是生态脆弱与退化地区进行生态修复和国土空间规划布局的基础。基于地区生态系统结构进行固碳功能评估,对于脆弱生态的修复措施和经济建设的政策调整有重要意义。

黄河流域的生态保护和高质量发展是重大国家战略。榆林地处黄河中游地区,丰富的资源储量使榆林具有明显的区位优势。然而,经济发展过程中的环境效应问题也逐渐成为限制榆林市经济与生态可持续发展的主要影响因素。生态系统的脆弱性加剧了环境保护难度,在当前全球变化背景下如何改善生态环境的同时增加应对环境压力和干扰的能力是榆林地区高质量发展的必然要求。笔者基于高分辨率遥感影像对榆林市生态系统固碳价值进行评估,分析环境变化和人类活动的影响,结合景观结构指数对固碳功能进行空间分析,尝试从系统的角度理解榆林市生态系统固碳功能变化特征,以期为榆林市生态建设和高质量发展提供科学依据。

## 1 研究方法 with 数据

### 1.1 研究区概况

榆林市位于黄河中游西岸,地理坐标为E 107°14'51"~111°14'31", N36°48'58"~39°35'7", 包含1市2区9县,总面积为42 920 km<sup>2</sup>。全市地势西北高、东西低,古长城以北的风沙草滩区占总面积的42%,风蚀沙化较严重,后备资源开发潜力大。南部黄土高原丘陵沟壑区占58%,地形破碎、水土流失严重。因为地处农牧交错区,榆林在相当长的时间一直以农牧业为主,从20世纪末开始发展轻重工业,到2006年开始以能化产业为主导,榆林经济进入了快速发展阶段。富集的能源矿产资源开发引发了对土地、植被资源的破坏,生态环境质量评价较差,局部地区甚至仍在恶化(陕西省生态环境状况公报, 2021)。

### 1.2 数据来源

遥感数据采用MOD17A3HGF数据(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),图像空间分辨率为500 m × 500 m,数据选用2000、2005、2010、2015和2020年。土地利用数据来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为1 km × 1 km,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地6个一级分类和25个二级分类。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 固碳服务功能价值

MOD17A3HGF数据是基于BIOME-BGC模型通过Terra卫星遥感参数计算的全球植被净初级生产力年际遥感监测产品。将MOD17A3HGF数据转化为NPP值,利用Modis Reprojection Tool对数据进行投影转换,生成1 km × 1 km的栅格数据。将生成数据与土地利用遥感监测数据和榆林市行政区划进行重采样、重分类、栅格计算等处理,得到2000~2020年榆林市6大类生产性土地的NPP统计数据。基于净生态系统生产力法对固碳功能进行估算(国家市场监督管理总局, 2020),采用市场价值法对固碳价值进行换算。CO<sub>2</sub>吸收价值根据2022年中国碳交易市场价格取58元/t。区县单位面积固碳价值通过各区县固碳价值量的总和与区划总面积换算得到,各区县面积加权平均

得到全市单位面积固碳价值。

### 1.3.2 林地系统综合指数

基于遥感数据通过 Fragstats 对景观格局进行计算。分别在景观和类型水平下选取斑块面积(CA)、斑块所占景观面积比例(PLAND)、斑块数量(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块占景观面积比(LPI)、景观形状指数(LSI)、平均斑块面积(AREA\_MN)、蔓延度指数(CONTAG)、斑块内聚力指数(COHESION)、聚集度指数(AI)等指标,对各类土地利用类型的景观指数进行计算。对各区县森林景观计算结果标准化处理后通过熵权法确定指标权重,计算得到各区县林地综合指数。对各年份分别计算,得到各区县林地综合指数趋势变化。

### 1.3.3 主成分分析

基于气象条件、土地利用及工业 GDP 占比对各区县固碳价值进行 PCA 分析(Principal Component Analysis),分析环境因素、生态系统结构和人类活动对固碳价值的影响。采矿是榆林地区最主要的重工业产业,由于缺乏直接的采矿数据,以工业 GDP 占比代表地区工业活动。数据分析使用 R-software (version-3.5.3)。

## 2 分析结果

榆林市 2000 年陆地生态系统固碳价值为 5 423 万元,2020 年达到 11 449 万元。西部的榆阳区、神木市、靖边县和定边县固碳价值总量最高,平均占全市 10% 以上。东南部的绥德县、米脂县、佳县、清涧县和子洲县固碳价值量占比较低,吴堡县最低仅约占 1%。2020 年榆林市固碳价值总量比 2000 年增加了

111%,但各区县间增幅不同。西部的榆阳区、神木市、定边县增幅低于全市,分别增长了 89% 和 96%,靖边县略高增加了 114%。东南部增幅高于全市水平,增幅基本高于 120%,清涧县增加了 175%。

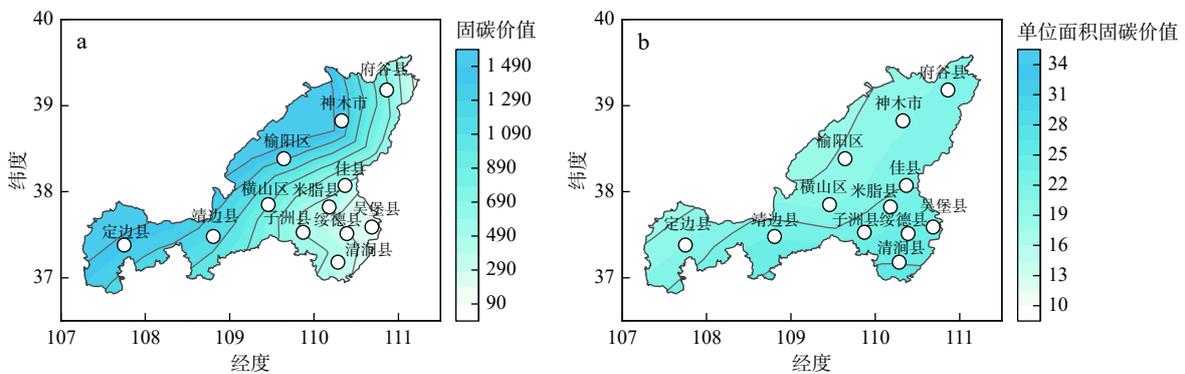
从土地利用类型看,榆林全市范围以草地和耕地为主,面积占比 82%。2000 年至 2020 年间全市草地和耕地固碳价值量分别增加了 116% 和 101%。林地在榆林地区占比较小,然而到 2020 年固碳价值量增加了 176%。建设用地增长速率最快固碳价值增幅最大。全市范围未利用土地持续缓慢减少,固碳价值量增幅最小。

## 3 讨论

### 3.1 榆林市固碳价值的空间分布与影响因素

榆林市固碳价值总量的空间分布西北高、东南低。因为价值总量估算是基于行政区划面积,对区划面积较小的区县会低估,笔者基于单位面积固碳价值对各区县生态系统固碳功能进行对比。榆林市单位面积固碳价值量多年平均 21.25 元/ha,东南部区县单位面积固碳价值水平高于全市,多年平均为 21.96~24.98 元/ha,西北部区县基本低于全市平均水平(图 1)。文中估算结果低于已报道的陕北榆林地区结果(李晶等, 2011; 封建民等, 2018),可能与数据分辨率以及采用的市场交易价格低于造林成本价格有关。榆林市单位面积固碳价值从东南向西北递减的空间分布趋势,与陕北地区 NPP 从南向西北递减的趋势一致(李登科等, 2022),显示出区域间土地利用类型的结构差异。

对 12 区县固碳价值的 PCA 运算显示东南部区县与西北部区县在 PC1(贡献率为 44.1%~57.5%)上表



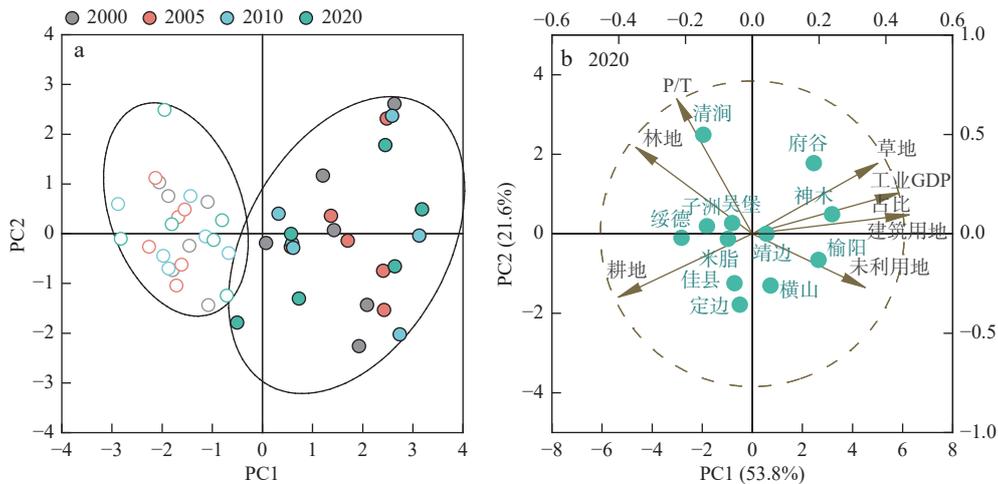
a. 多年平均固碳价值量(10<sup>4</sup>元); b. 多年平均单位面积固碳价值量(元/ha)

图 1 榆林市生态系统固碳服务价值空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of value of carbon sequestration service in Yulin ecosystem

现出显著差异(图 2a),西北部区县正向分布,东南部区县负向分布。20年间工业 GDP 占比对 PC1 的贡献率始终较高,建筑用地的相关性也逐渐增加,表明榆林市生态系统固碳价值主要依据工业活动形成东南部区县和西北部区县的划分,这与榆林市矿产资源集中分布在市域西北部吻合。西北部区县矿产资源富集,采矿活动等重工业发达,对地表的破坏可以直接影响生态系统固碳服务功能。神木市是榆林典型的

采矿工业区,煤矿资源丰富,工业 GDP 占比在 20 年间从 86% 增加到 98%,对 PC1 的负荷也从 2.09 增加到 3.18,表明该区域生态系统固碳价值与工业、建设活动的相关性在逐渐增加。榆林市西北部区县如榆阳区、府谷县也都表现出受工业建设活动影响增加的相似趋势(图 2b)。气象条件对 PC2 轴的贡献率较高。可能受退耕还林还草政策导致的土地利用结构调整影响,各区县没有表现出显著差异。



a.各区县 2000、2005、2015 与 2020 年的 PCA 排序, 实心点为西北部区县分组, 空心点为东南部区县分组; b.各区县 2020 年主分量分布

图 2 榆林市 12 区县的 PCA 排序

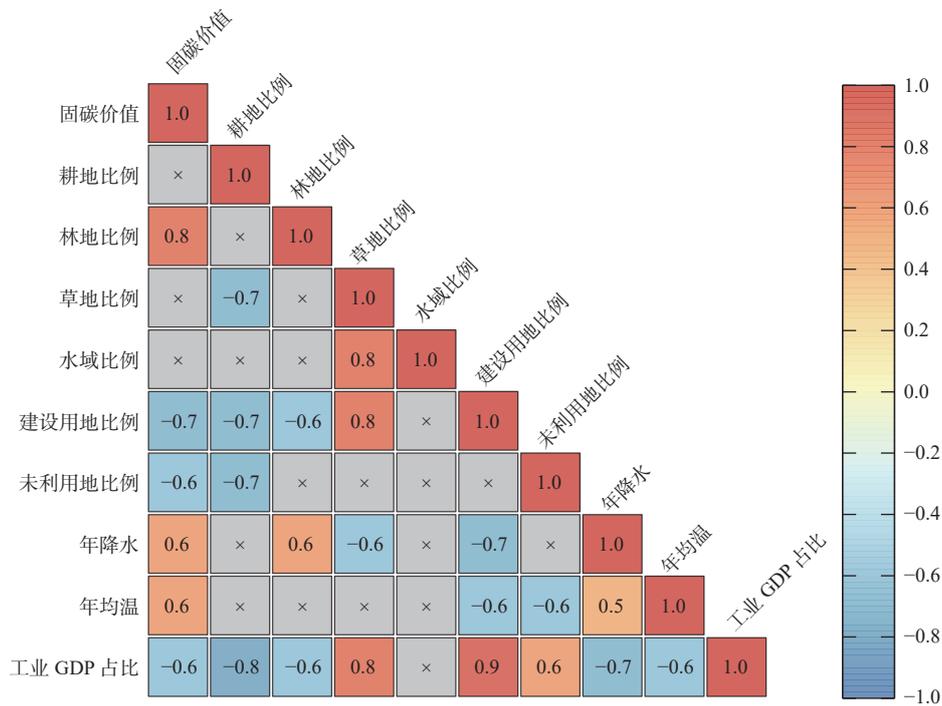
Fig. 2 The PCA distribution figure of 12 counties of Yulin

榆林市地貌类型南北不同,西北部是毛乌素沙漠南缘风沙草滩区,南部是黄土高原丘陵沟壑区。全市土地利用类型基本以草地和耕地为主,贡献了全市约 83% 的固碳价值。尽管耕草地比例在各区县不同,两种土地利用类型的固碳价值总量并不存在显著差异。东南部区县的林地面积比例较高,因而林地固碳贡献在东南部区县相应增加。西北部靖边县、榆阳区、神木市、府谷县、横山县、定边县 3%~4% 的林地固碳贡献,在东南部区县增加到 10% 以上,绥德县和清涧县可以达到 17%,提升了东南部区县的单位面积固碳价值。单位面积固碳价值与林地比例的显著正相关(图 3),以及与建设用地及工业活动的负相关表明,在采矿、工业建设等人类活动干扰会损害地区生态系统固碳功能,生态系统结构尤其是林地比例对固碳价值的提高有重要影响。

全市范围看生态系统固碳价值的增长变化也表现出明显的空间差异。全市单位面积固碳价值在 2000~2020 年间持续增长,然而区域间增长速率不同

(图 4a)。2020 年西北部 6 区县固碳价值总量增加了 4 357 万元,平均增长率了 107%,平均增长速率为 0.67。东南部 6 区县虽然行政区划面积小,固碳价值总量仅增加 1 668 万元,然而区域内林地系统的面积比例、平均斑块面积更高(图 4b),增长速率也显著高于西北部区县( $p < 0.05$ )。林地系统较高的比例和增长率使东南部区县单位面积固碳价值平均增加了 147%, 0.955 的增速显著高于西北部区县( $p < 0.01$ )。

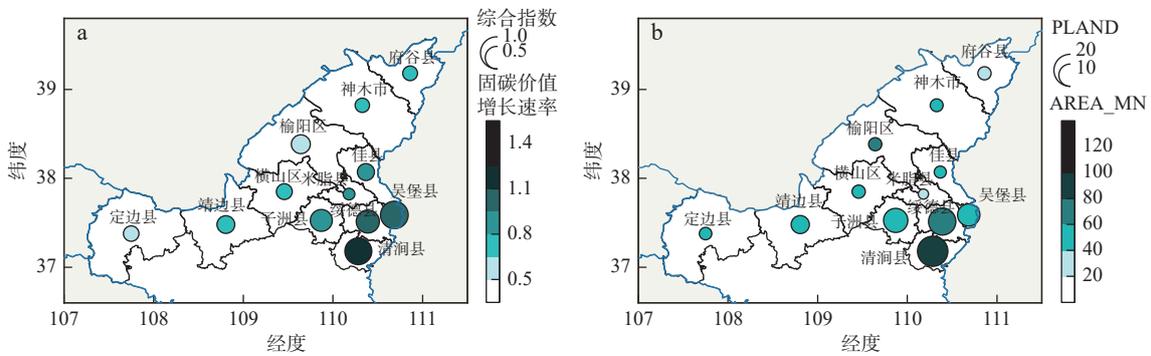
榆林地处中国干旱半干旱地区,黄土高原与沙漠过渡地带,脆弱的生态条件导致植被生长敏感易变。全球变化背景下,榆林地区也表现出气候暖干化和水资源减少趋势(杨文峰等, 2002; 王德丽等, 2011),多坡地的地貌结构可能进一步加深地表干旱。矿产开发对土地资源的破坏如果不加以维护管理,容易受到人类活动干扰而退化,从而降低生态系统的稳定和功。林地综合结构指数显示榆林市东南部区县相对较高(图 4a)。这种差异不仅仅因为林地总面积比例在东南部区县相对较高,而是区域内林地类型密度、



图中数字为相关系数(p<0.05); ×代表无显著相关; 固碳价值为单位面积固碳价值; 土地类型比例为面积比例

图 3 榆林市固碳价值影响因素相关性分析结果

Fig. 3 Correlation analysis results of influencing factors of carbon sequestration value in Yulin



a.圆代表榆林市森林类型综合指数, 颜色代表单位面积固碳价值增长速率; b.圆代表森林景观类型面积比例, 颜色代表森林类型平均斑块面积

图 4 榆林市生态系统固碳价值增长速率与森林系统景观结构综合指数

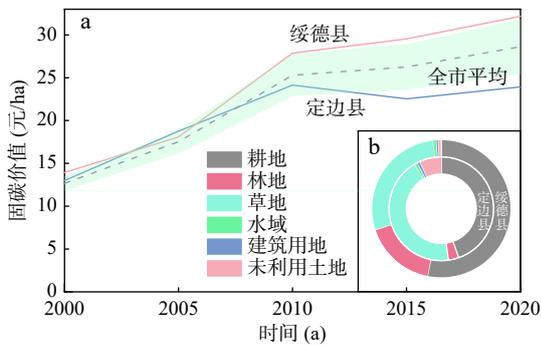
Fig. 4 The growth rate of carbon sequestration value in Yulin and forest ecosystem landscape structure comprehensive index

大小、形状、临近度、连通性等的综合表现, 表明森林生态系统的结构性在东南部区县相对较好, 合理的生态修复和管理措施必然能够更好的发挥系统功能性。西北部区县林地系统结构性相对较差, 不仅受地理条件限制, 也与地方产业有关。榆林市作为中国能源化工基地, 大量的矿产资源集中分布在西北部区县, 矿山开发挤占了资源并造成景观破碎化, 不利于植被发展。神木市林地类型比例、平均面积大小、连通性在全市基本处于最低值, 且在不断恶化, 林地综合指

数较低并具有较大波动。矿山开发对林地生态系统结构的破坏不仅影响了当前的固碳功能, 而且可能会对系统的稳定性及水土保持等生态系统服务产生影响。由这种潜在影响得知, 在易发生土壤侵蚀或地质灾害的黄土高原地区(孙萍萍等, 2022; 仲原等, 2022)的生态建设, 应尽可能加强系统的整体性、结构性, 协调好地区土地利用规划, 避免景观的破碎化, 加强水资源利用成效, 从而实现地区长期的“双碳”目标。

### 3.2 榆林固碳价值的年代变化

2000~2020年榆林市固碳价值持续稳定增长,然而2000~2010年增长率显著高于2010~2020年(图5)。定边县和绥德县位于榆林市南部,两县都没有煤矿开采,工业GDP占比不高,2020年分别仅占全县GDP总值的10%和15%。两县均是以耕地为主的传统农业县,建筑用地很少,土地利用类型的差异主要是林地和未利用地(图5b)。林地较多的绥德县单位面积固碳价值更高(图5b),增长率也更高(图5a)。为了在更小尺度进行对比,分别在两县基于相似土地利用结构选取了10 km × 10 km样方,绥德县样方不仅固碳价值提高了27.5%,20年间固碳价值的增长率也提高了92%。



a.榆林市生态系统单位面积固碳价值随时间变化,虚线为12区县平均值,阴影为标准偏差,红线为绥德县,蓝线为定边县;b.定边县与绥德县土地利用结构

图5 榆林市生态系统单位面积固碳价值动态变化

Fig. 5 The dynamic change of value of carbon sequestration of Yulin

1999年,陕西在全国率先开展了退耕还林还草试点,榆林市重点实施了建设工程,并从2006年起陆续出台了一系列土地利用规划,加强土地整治与生态环境建设。全市耕地面积在2000~2010年下降较快( $p < 0.01$ ),2010~2020年下降速率减缓。20年间草地和林地整体呈上升趋势,然而草地面积在2010~2020年出现下降,只有林地始终保持增加。耕地和草地面积变化的年代差异达到显著水平,林地增长达到极显著水平( $p < 0.01$ )。土地整治政策的实施改善了榆林市的生态环境,自然植被的逐渐恢复有效促进了生态系统固碳功能的提高。2000~2010年榆林市林地固碳价值增加337.66万元,2010~2020年增加116.13万元。相应各区县固碳价值总量增加量和增长率均表现出极显著年代差异( $p < 0.01$ )。西北部

区县受采矿等工业建设活动影响,固碳价值增长速率普遍较低。加强全域统筹规划,因地制宜提高生态系统结构的协调性,对榆林市西北部地区的生态修复与建设有重要意义。

## 4 结论

(1)2000~2020年榆林市生态系统固碳服务价值持续增长,2000年代固碳价值年增长480万元/a,2010年代增速减缓年增长120万元/a。全市单位面积固碳价值空间分布呈现从东南向西北递减的趋势,东南部区县单位面积固碳价值增长速率也更快。

(2)采矿工业活动是形成榆林市西北、东南各区县分划的主要因素,东南部工业活动少、林地占比较高,固碳价值主要受生态系统结构性变化的影响。

(3)榆林地区长期的资源开发导致地表景观的破碎化,降低了系统的稳定性。长期来看,未来实施退耕还林还草与生态修复建设工程时,应尽可能扩大单个系统类型面积、避免分散,综合考虑生态系统的整体性,以改善林地系统的结构性与稳定性,实现提质增效。后续可进一步对生态系统服务价值总量进行核算,深入分析系统结构变化影响下的系统功能变化。

## 参考文献(References):

- 陈仲新,张新时.中国生态系统效益的价值[J].科学通报,2000,45(1):17-22.
- CHEN Zhongxin, ZHANG Xinshi. The value of ecosystem benefits in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(1): 17-22.
- 封建民,文琦,郭玲霞.风沙过渡区土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以榆林市为例[J].水土保持研究,2018,25(4):304-308.
- FENG Jianmin, WEN Qi, GUO Lingxia. Effects of land use change on the ecosystem service value in ecotone of wind and sand[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 304-308.
- 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.生态系统评估、生态系统生产总值(GEP)核算技术规范[S].国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会,2020.
- 李登科,王钊.气候变化和人类活动对陕西省植被NPP影响的定量分析[J].生态环境学报,2022,31(6):1071-1079.
- LI Dengke, WANG Zhao. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on vegetation NPP in Shaanxi Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(6):

- 1071–1079.
- 李晶, 任志远. 基于 GIS 的陕北黄土高原土地生态系统固碳释氧价值评价[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(14): 2943–2950.
- LI Jing, REN Zhiyuan. Research on the values of CO<sub>2</sub> fixation and O<sub>2</sub> release by landuse ecosystem in Loess Plateau in Northern Shaanxi province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(14): 2943–2950.
- 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. *生态学报*, 1999, 19(5): 607–613.
- OUYANG Zhiyun, WANG Xiaoke, MIAO Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607–613.
- 潘勇军, 王兵, 牛香. 让自然资本成为主流, 用生态 GDP 核算美丽中国. 温带林业研究[J]. *温带林业研究*, 2018, 1(3): 10–18.
- PAN Yongjun, WANG Bin, NIU Xiang. Mainstreaming the economics of natural capital and accounting the eco-GDP of beautiful China[J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2018, 1(3): 10–18.
- 陕西省生态环境厅. 2021 年陕西省生态环境状况公报[R]. 陕西省生态环境厅, 2022.
- 孙萍萍, 张茂省, 贾俊, 等. 中国西部黄土区地质灾害调查研究进展[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 96–107.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, JIA Jun, et al. Geo-hazards research and investigation in the Loess Regions of Western China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 96–107.
- 王德丽, 殷淑燕, 王海燕, 等. 近 50 年陕北地区的气候变化[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(2): 262–267.
- WANG Deli, YIN Shuyan, WANG Haiyan, et al. Analysis on climate change in North Shaanxi Province[J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(2): 262–267.
- 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243–1254.
- XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243–1254.
- 杨文峰, 李星敏, 鲁渊平. 陕西省近 50 年气候变化及其对水资源的影响[J]. *陕西气象*, 2002, 6: 1–6.
- YANG Wenfeng, LI Xingmin, LU Yuanping. YANG Wenfeng, LI Xingmin, LU Yuanping[J]. *Journal of Shaanxi Meteorology*, 2002, 6: 1–6.
- 仲原, 王春梅, 庞国伟, 等. 黄土高原浅沟空间分异特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1798–1810.
- ZHONG Yuan, WANG Chunmei, PANG Guowei, et al. Spatial variation of ephemeral gully in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5): 1798–1810.
- Cortina J, Maestre FT, Vallejo R, et al. Ecosystem structure, function, and restoration success: are the related?[J]. *Journal for Nature Conservation*, 2006, 14: 152–160.
- Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253–260.
- Elmqvist T, Folke C, Nyström M, et al. Response diversity, ecosystem change, and resilience[J]. *The Ecological Society of America*, 2003, 1(9): 488–494.