

陕西省土地利用变化的时空演变特征及 碳储量效应和预测

孙亚欣¹, 孟庆伦²

(1. 英国利兹大学 地理学院, 英国 西约克郡; 2. 河北政法职业学院, 石家庄 050061)

摘要: [目的] 系统分析1980—2020年陕西省土地利用时空演变特征及碳储量效应, 探索土地利用格局演变对碳储量的驱动机制, 同时基于多情景模拟预测未来土地利用对碳储量的差异化影响, 为省域尺度碳中和战略实施提供科学支撑。[方法] 基于1980—2020年土地利用数据、碳密度数据及土地利用驱动因子, 结合土地利用动态指数法、转移矩阵解析土地利用演变特征, 运用InVEST模型估算碳储量变化, 通过FLUS模型设置自然发展、耕地保护、生态保护3种情景模拟2030年土地利用格局及碳储量效应。[结果] (1) 1980—2020年陕西省土地利用格局基本稳定, 农田减少17 294.52 km²、其他用地减少2 423.89 km², 林地、草地、水体、建设用地分别增加2 422.14 km²、8 468.97 km²、373.11 km²、8 454.19 km², 2000—2020年变化最剧烈, 建设用地动态度最高; (2) 陕西省陆地生态系统碳储量累计下降2.01 Tg, 其中建设用地扩张造成碳储量下降27.77 Tg, 建设用地扩张是主要驱动因素; 林地碳储量增加21.29 Tg缓解碳损失, 碳储量空间呈“南高北低”分布; (3) 2030年多情景模拟显示, 生态保护情景碳储量增加6.07×10⁶ t, 自然发展情景下降2.69×10⁶ t, 耕地保护情景下降3.684×10⁷ t, 生态保护情景为唯一实现碳汇增强的路径。[结论] 受政策与城镇化进程共同驱动, 建设用地扩张是碳储量下降的核心因素, 林地扩张可有效缓解碳损失; 未来需优化土地利用格局, 在耕地保护与生态修复间寻求平衡, 支撑碳中和目标实现。

关键词: 陕西省; 碳储量效应; 土地利用变化; InVEST模型

中图分类号: X171.1; P208

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0244-11

Spatiotemporal evolution characteristics of land use change and its carbon storage effects and prediction in Shaanxi Province

Sun Yaxin¹, Meng Qinglun²

(1. School of Geography, University of Leeds, Woodhouse Lane, Leeds, West Yorkshire LS2 9JT, United Kingdom; 2. Hebei Professional College of Political Science and Law, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: [Objective] This study aims to systematically analyze the spatiotemporal evolution characteristics of land use and its carbon storage effects in Shaanxi Province from 1980 to 2020, explore the driving mechanism of land use pattern evolution on carbon storage, and predict the differential effects of future land use on carbon storage based on multi-scenario simulations, thereby providing scientific support for the implementation of carbon neutrality strategy at the provincial scale. [Methods] Based on land use data, carbon density data, and land use driving factors from 1980 to 2020, the land use dynamic degree index method and transfer matrix were employed to analyze the land use evolution characteristics. The InVEST model was applied to estimate carbon storage changes, and the FLUS model was used to simulate the land use pattern and carbon storage effects in 2030 under three scenarios: natural development, cultivated land protection, and ecological protection. [Results] (1) From

收稿日期: 2025-08-11

修回日期: 2025-09-13

接受日期: 2025-09-16

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“丝绸之路城镇历史地段文化生态内生机制及其适宜性更新规划模式”(52078404)

第一作者: 孙亚欣(2001—), 女, 山东淄博人, 硕士, 主要从事城市规划理论与方法研究。E-mail: ll948603994@163.com

通信作者: 孟庆伦(1995—), 男, 山东聊城人, 硕士, 讲师, 主要从事城市生态理论研究。E-mail: 647866849@qq.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

1980 to 2020, the land use pattern in Shaanxi Province remained generally stable. Farmland decreased by 17 294.52 km² and other land decreased by 2 423.89 km², while forest land, grassland, water body, and construction land increased by 2 422.14 km², 8 468.97 km², 373.11 km², and 8 454.19 km², respectively. The most dramatic changes occurred from 2000 to 2020, with construction land showing the highest dynamic degree. (2) The carbon storage of terrestrial ecosystems in Shaanxi Province decreased cumulatively by 2.01 Tg. The expansion of construction land led to a decrease of 27.77 Tg and was the main driving factor. The carbon storage of forest land increased by 21.29 Tg, mitigating carbon loss. Spatially, carbon storage showed a distribution pattern of “high in the south and low in the north”. (3) The multi-scenario simulations for 2030 indicated that under the ecological protection scenario, carbon storage increased by 6.07×10^6 t. Under the natural development scenario, it decreased by 2.69×10^6 t. Under the cultivated land protection scenario, it decreased by 3.684×10^7 t. The ecological protection scenario was the only pathway that achieved enhanced carbon sequestration. [Conclusion] Driven by both policies and urbanization, the expansion of construction land is the core factor leading to carbon storage decline, while forest land expansion can effectively mitigate carbon loss. In the future, it is essential to optimize the land use pattern, seek a balance between cultivated land protection and ecological restoration, and support the achievement of the carbon neutrality goal.

Keywords: Shaanxi Province; carbon storage effect; land use change; InVEST model

土地作为人类活动的空间基础,不仅是社会发展的重要生存资源与生产要素,还维系着气候、土壤、水文、植被等生态平衡并促进区域可持续发展的功能^[1]。土地利用变化是有限土地资源在不同主导功能间进行数量与结构调整,以及空间配置变化与迁移的动态过程^[2-3],是气候变化、生态系统变化、人类脆弱性等变化的主要驱动因素之一,其通过改变生态系统的空间格局,影响生态环境的结构与功能,是气候变化、生态系统演变和人类脆弱性等多种变化的重要驱动因素之一^[4]。研究土地利用变化不仅有助于揭示区域环境演变规律,也是国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP)和国际全球环境变化人文因素计划(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP)的核心内容^[5-6],因而成为全球学术界关注的重点领域。

在陆地生态系统内,碳元素主要分布于植被地上部分、根系生物量、土壤基质以及有机残体4个关键碳汇区域^[7]。不同土地利用类型为生态系统提供多种服务功能,其中固碳功能是最重要的一项^[8]。由于植被、水体的差异,导致各土地利用类型的固碳能力有所不同^[9]。土地利用变化过程势必会改变原来生态系统的植被类型、植物生长、水文状况和土壤理化性质等环境条件,从而对区域碳储量产生深刻影响^[10]。不少研究表明,土地利用变化会造成区域碳储量的流失,并以温室气体形式释放到大气中,使陆地生态系统逐渐演变成一个巨大的碳源,增强区域的温室效应^[10-11]。然而,也有研究报道,土地利用变化可以使CO₂储存到

植被和土壤中,使陆地生态系统的碳汇能力得到不断增强,增加了区域土壤碳储量^[12-13]。

合理的土地利用变化模式直接关系到长时间尺度下区域的可持续发展^[14-15]。近年来,相关学者围绕往期土地利用变化与碳储量关系开展大量研究,研究多聚焦于流域或省级尺度,强调耕地减少和建设用地扩张导致碳储量下降,以及退耕还林等生态工程对碳汇产生积极作用等。然而现有研究存在两方面不足,一是多集中于全国或流域尺度,对省域尺度缺少深入探讨;二是对地形复杂、城镇化与生态政策并行地区的系统分析不足,缺少对陕西省这类典型区域的时空演变规律、模拟和碳效应研究。

在研究方法上,根据不同尺度和精度,多结合清单法^[9]、生态系统过程模型(CASA, CENTURY, Biome-BGC)^[10]、遥感监测和实测结合^[14]、生态系统服务评估模型(InVEST碳储量模块)^[15],而InVEST能够在区域尺度快速评估不同土地利用格局下的碳储量效应,因而得到广泛应用。此外,相关研究多停留在历史时段的碳储量测算与归因分析,缺少对未来情景的系统模拟,近年来,FLUS(Future Land Use Simulation)模型因引入神经网络和自适应惯性竞争机制,被广泛用于未来土地利用格局的空间模拟,与常规的CLUE-S,CA-Markov等模型相比,FLUS模型更适合刻画快速城市化与生态保护政策双重驱动下的土地利用动态演变^[16]。

因此本研究结合土地利用动态度、转移矩阵与InVEST-FLUS模型,在省域尺度系统评估陕西省40 a土地利用变化及碳储量效应,探索土地利用格局

演变对碳储量的驱动机制;各类型土地利用转换过程对碳储量的贡献率如何;并基于不同情景预测分析土地利用对碳储量将产生的差异化影响等,为省域尺度碳中和路径提供参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

陕西省地处中国内陆腹地,位于黄河中游地区,地理坐标位置介于31°42′—39°35′N,105°29′—111°5′E。其东侧与山西省接壤,东南部毗邻河南省与湖北省,南部与四川省相连,西部与甘肃省相接,西北部与宁夏回族自治区相邻,北部则与内蒙古自治区交界。从地形特征来看,陕西省南北向狭长,约870 km;东西向相对较窄,200~250 km,地形主要由黄土高原、关中平原和秦巴山区三大地貌单元构成,呈现出南北高、中部低的地势特征,最大高差可达3 600 m^[17-18]。陕西省从南向北跨越了北亚热带季风、暖温带季风和温带季风气候3大气候带,区域差异明显^[19],年

平均气温7~16℃,年降水量为500~700 mm,降水主要集中在7—10月,年内分配不均^[20]。全省分布有延河、渭河等583条河流,分别属于长江和黄河两大水系,形成了密集的河网。

从碳储量效应研究角度看,陕西省具有较强典型性。黄土高原生态脆弱、土壤碳易流失,秦巴山区森林覆盖率高,是重要碳汇,关中平原城镇化迅速,建设用地扩张削减碳储量^[21]。全省跨越多气候带,植被固碳能力差异显著;自1999年退耕还林工程实施以来,陕北和陕南林草恢复提升了碳汇功能^[22]。作为粮食主产区与生态恢复重点区,陕西在耕地保护与生态修复间的矛盾突出,具有区域代表性和推广意义。

1.2 数据来源

用于陕西省碳储量及其变化估算的数据主要包括:土地利用数据、陕西省内共393个典型样点碳密度数据库、3类12个土地利用变化的驱动因子(表1,2)。

表1 陕西省碳储量及其变化估算的主要数据

Table 1 Main data for estimating carbon storage and its changes in Shaanxi Province

数据类型	数据描述	年份	格式与分辨率	数据来源
土地利用	农田、森林、草地、水体、建设用地、其他用地	1980,1990,2000,2010,2020	栅格,1 km	中国科学院资源环境科学数据中心
碳密度	地上生物量碳密度 地下生物量碳密度 土壤碳密度	2004—2014	—	2010s中国陆地生态系统碳密度数据集 (http://www.cern.ac.cn) ^[19]

表2 陕西省土地利用驱动因子

Table 2 Land use driving factors in Shaanxi Province

驱动类型	数据描述	因子说明	数据来源
自然地理因素	高程	各个像元的高程值	中国科学院资源环境科学数据中心, http://www.resdc.cn/
	坡度	各个像元的切平面与水平地面的夹角	
	坡向	各个像元的切平面与水平地的投影方向	
	气温	各个像元的平均气温值	国家气象科学数据中心, http://data.cma.cn
	降水	各个像元的年积累降水量值	
交通区位	距市中心的距离	像元几何中心到最近城市的欧氏距离	OpenStreetMap, https://www.openstreetmap.org/ ;高德地图, https://ditu.amap.com/
	距镇中心的距离	像元几何中心到最近城镇的欧氏距离	
	到河流的距离	像元几何中心到最近河流的欧氏距离	
	到高速的距离	像元几何中心到最近高速公路的欧氏距离	
	到铁路的距离	像元几何中心到最近铁路的欧氏距离	
社会经济因素	GDP	各个像元的国内生产总值	地理检测云平台, http://www.dsac.cn/
	人口密度	各个像元的常住人口数量	WorldPop, https://www.nature.com/articles/sdata20174/

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用动态指数法 土地利用动态指数是评估某一时期内研究区域地类转换特征的重要指标^[23],其可有效反映该区域土地利用类型变化的强度,并为不同地类、时段或区域间的差异分析提供依据。

结合指数能够掌握区域土地利用演变趋势及其结构变迁特征。其中,单一地类动态指数主要用于衡量特定时段内某类用地面积的变化情况,其公式如下:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中:在研究时段内,特定土地利用类型的动态指数为 K ;该类型在期初和期末的面积分别以 U_a 和 U_b 表示; T 为研究时段长度,当 T 以年为单位时, K 值即表征该区域土地利用类型的年度变化率。

综合土地利用动态指数则用于量化特定时段内各类土地的整体转换程度,该指标能够有效反映区域土地利用变化速率,其公式如下:

$$LC = \left[\frac{\sum_{i=1}^n LU_{i-1}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \right] \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中:在监测起始时,第 i 类土地利用类型的面积记为 LU_i ;在监测期间,该类型转化为其他类型土地的面积绝对值记为 ΔLU_{i-1} 。监测时段长度以 T 表示,当 T 以年为单位时,其计算所得的 LC 即为土地利用综合动态指数。区域内土地利用类型的总数用 n 表示。

1.3.2 土地利用转型矩阵 土地利用转移矩阵作为一种定量描述系统状态和状态转移的分析工具,能够有效反映土地利用类型间的相互转换特征。本研究以陕西省为研究对象,采用 ArcGIS 空间分析功能,通过叠加不同时期的土地利用栅格图,并结合数据透视表生成转移矩阵表。该方法不仅能够直观展示土地利用类型的转移方向和转换面积,还可深入分析土地利用结构的变化过程。

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & S_{ij} & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: S 代表不同土地利用类型的面积; S_{ij} 表示从第 i 类土地利用类型转变为第 j 类的面积。矩阵的行向量反映了第 i 类土地向各类别转换的分布情况,而列向量则描述了各类土地向第 j 类转换的输入来源; i 和 j 分别为研究初期与末期的土地利用类型; n 为土地利用类型总数。

1.3.3 InVEST 碳储量评估模型 在 InVEST 模型的 Carbon 模块中,总碳储量的测算体系包含 4 个核心要素:地下碳密度、地上碳密度、死亡有机质碳密度以及土壤有机质碳密度。基于“三生空间”分类体系,该模块通过整合地表、地下、土壤层及死亡有机物的平均碳密度数值进行运算^[24]。研究区域的总碳储量可通过将各类“三生空间”的面积与其对应碳密度值相乘后累加获得。其公式如下:

$$C_i = C_{i-above} + C_{i-below} + C_{i-soil} + C_{i-dead} \quad (4)$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \quad (5)$$

式中: C_i 表征第 i 类的全域碳密度(t/hm^2),其组成包括地上部分生物量碳密度($C_{i-above}$)、地下部分生物量

碳密度($C_{i-below}$)、土壤碳密度(C_{i-soil})以及死亡有机物质碳密度(C_{i-dead}); n 代表土地利用的总类别数。

本研究中包含 6 种土地利用类型,建设用地是硬化表面,因此将其碳密度设置为 0;水域作为特殊的土地利用类型也设置为 0。具体碳密度数据如表 3 所示。

表 3 陕西省土地利用类型碳密度
Table 3 Carbon density of land use types in Shaanxi Province Mg/hm²

土地利用类型	$C_{i-above}$	$C_{i-below}$	C_{i-soil}	C_{i-dead}
农田	5.22	3.23	37.91	0.00
森林	20.93	5.37	61.62	0.00
草地	2.60	6.67	45.96	0.00
水体	0.00	0.00	0.00	0.00
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用地	1.03	1.14	52.34	0.00

1.3.4 土地利用变化的碳储量贡献率 土地利用变化的碳储量贡献率可以用每一种土地利用类型转换导致的碳储量变化在该时段总体碳储量变化中的比率来表示^[25]:

$$R = \frac{(C_b - C_a) S_i}{\Delta TC} \quad (6)$$

式中: R 为碳储量贡献率; C_b, C_a 分别表示土地利用类型转换所反映的研究期末和期初对应的综合碳密度; S_i 为该种变化类型的土地利用面积; ΔTC 表示研究期间总碳储量的变化量。

1.3.5 FLUS 模型模拟 (1) 驱动因子选择。结合陕西省自然环境与社会经济特征,选取高程、坡度、距河流距离、距道路距离、人口密度、GDP 等作为主要驱动因子。通过 ANN 学习不同因子与土地利用类型空间分布之间的关系,得到各用地类型的适宜性概率。

(2) 模型参数设置。依据 1980—2020 年的五期土地利用数据,利用 Markov 模型预测未来各类土地利用需求量,并在 FLUS 模型中作为约束条件。惯性系数与竞争机制参数通过多次试验调整,以提高模拟精度。

(3) 情景设计。设置 3 种模拟情景:(1) 自然发展情景,假设现有发展趋势延续;(2) 耕地保护情景,限制耕地转为建设用地;(3) 生态保护情景,增加林地与草地面积,以响应退耕还林等政策。

(4) 结果输出与验证。利用 2010—2020 年土地利用数据对模型进行精度验证(Kappa 系数、整体精度),并在此基础上模拟 2030 年、2040 年的土地利用格局。随后将模拟结果输入 InVEST 碳储量模块,评估不同情景下的碳储量变化与空间分布特征。

2 结果与分析

2.1 陕西省土地利用变化分析

2.1.1 陕西省土地利用变化时空分布特征 1980—2020年陕西省土地利用分布格局基本一致。从空间分布来看,陕西省土地利用类型主要以草地、农田和林地为主。其中,1980年草地面积约为 $7.19 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省总面积的38.3%,为面积最大类型;其次是农

田,约 $6.35 \times 10^4 \text{ km}^2$,占33.8%;再次是林地,约 $4.48 \times 10^4 \text{ km}^2$,占23.8%。三者面积合计约占陕西省总面积的95%。农田在陕西全省境内均有分布,而森林和草地主要集中在陕南秦巴山区和陕北南部黄土高原区;建设用地主要集中在关中平原,以西安市为核心区,1980年为 $5.28 \times 10^3 \text{ km}^2$,到2020年增加到 $7.86 \times 10^3 \text{ km}^2$;未利用地主要位于陕北,1980年为 $4.49 \times 10^3 \text{ km}^2$,到2020年减少至 $2.90 \times 10^3 \text{ km}^2$ (图1)。

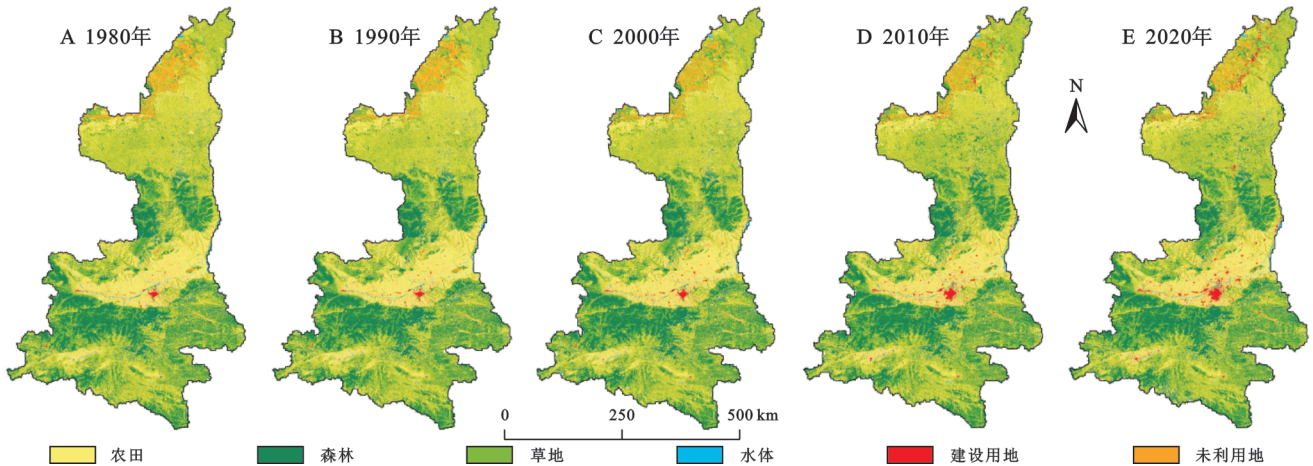


图1 1980—2020年陕西省土地利用类型空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of land use types in Shaanxi Province (1980—2020)

从时间变化来看,1980—1990年陕西省土地利用变化较小。1990—2000年其他用地面积大幅减少,共减少 $1\,287.01 \text{ km}^2$,而草地和建设用地面积则开始增加。2000—2010年该时期陕西省土地利用变化最为剧烈,农田大面积减少,减少面积为 $3\,699.98 \text{ km}^2$;除农田、水体和其他用地之外,其余空间均逐步扩展,其中以林地面积增幅最大,为 $1\,673.27 \text{ km}^2$,这

与“退耕还林”政策密切相关。2010—2020年农田面积仍存大面积减少,为 $1\,393.94 \text{ km}^2$;此外,草地和其他用地面积也有所下降;该时间段内建设用地面积增加最大,为 986.60 km^2 ,说明陕西省城市化进程仍在继续。综上,1980—2020年陕西省土地利用变化表现出农田、其他用地及水体面积不断减缩,林地、草地及建设用地不断增加的趋势(表4)。

表4 1980—2020年陕西省土地利用类型面积变化

Table 4 Area changes of land use types in Shaanxi Province (1980—2020)

类型	1980—1990年	1990—2000年	2000—2010年	2010—2020年	1980—2020年
农田	-53.71	105.38	-3699.98	-1393.94	-5042.25
林地	20.54	197.66	1673.27	530.67	2422.14
草地	15.78	634.00	1119.76	-224.66	1544.87
水体	-46.80	-36.67	-0.99	118.02	33.56
建设用地	55.73	386.75	1149.11	986.60	2578.19
其他用地	7.69	-1287.01	-240.04	-33.77	-1553.13

2.1.2 土地利用变化动态度及转移矩阵 通过对1980—2020年陕西省土地利用格局的演变进行分析,本研究采用动态变化度(图2)与空间转换矩阵相结合的方法,系统解析了该区域土地覆被类型的时空演变规律。(1)各类型强度。从各类土地利用变化动态度来看,1980—2020年陕西省土地利用变化呈现出建设用地>其他用地>农田>林地>草地>水体的态势。(2)各时段强度。40年间陕西省综合动态度为

0.32,其中2000—2010年综合动态度值最大,为0.19,1980—1990年最小,为0.004 9(表5),表明2000—2010年陕西省土地利用转型最为剧烈。

同时结合土地利用转移过程来揭示陕西省土地利用变化方向和规模(表6)。(1)农田面积变化量最大,为 $5\,040.83 \text{ km}^2$,主要转入类型为草地和森林,主要转出类型为草地、建设用地和森林;(2)建设用地面积变化量位居第二,为 $2\,578.16 \text{ km}^2$,主要转入类型

为农田、草地与其他用地,由建设用地转出为其他土地利用类型的规模较小;(3)森林面积变化量位居第三,为2 430.59 km²,主要由农田和草地转入;(4)其他用地面积变化量位居第四,为1 552.62 km²,主要转出为草地;(5)草地面积变化量位居第五,为1 546.32 km²,主要由农田、未利用地转入,主要转出类型为农田和森林;(6)水体面积变化最小,仅为38.37 km²。总体来说,近40年间陕西省土地利用变化较大,其中以2000—2010年最为显著,农田、草地、森林之间相互转换规模较大。可以得出,政策因素在陕西省土地利用变化中起重要的作用,1980—2020年陕西省在城镇化和“退耕还林”政策的推动下,建设用地和森林面积不断增加,占据了大量农田和其他用地。

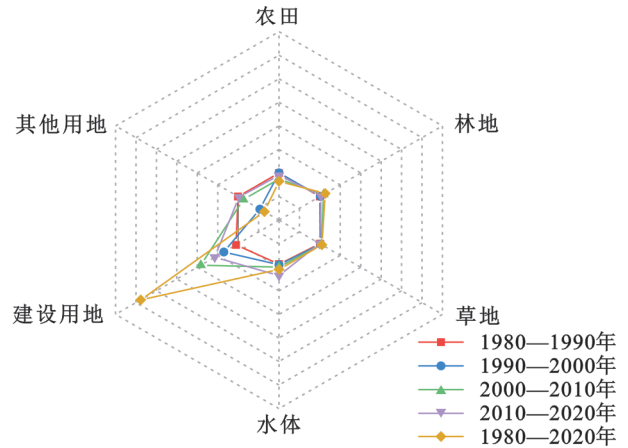


图2 1980—2020年陕西省土地利用单一动态度变化
Fig. 2 Changes in single dynamic degree of land use in Shaanxi Province (1980—2020)

表5 1980—2020年陕西省土地利用综合动态度变化表

Table 5 Changes in comprehensive dynamic degree of land use in Shaanxi Province (1980—2020)

项目	1980—1990	1990—2000	2000—2010	2010—2020	1980—2020
综合动态度	0.0049	0.06	0.19	0.08	0.32

表6 1980—2020年陕西省土地利用转移过程

Table 6 Process of land use transition in Shaanxi Province (1980—2020)

土地利用类型	2020年						
	农田	森林	草地	水体	建设用地	其他用地	转入量
1980年							
农田	63514.25	366.62	2414.64	161.74	104.06	203.86	66765.17
森林	1628.13	44730.61	2099.58	15.45	23.45	79.61	48576.83
草地	4446.24	903.69	71902.19	81.78	19.38	1288.88	78642.15
水体	183.22	13.14	107.93	1468.76	3.98	15.84	1792.87
建设用地	1966.23	87.79	406.58	20.06	2552.50	248.50	5281.66
其他用地	67.93	44.38	164.91	6.71	0.14	4206.73	4490.79
转出量	71805.99	46146.23	77095.83	1754.50	2703.50	6043.41	205549.47
变化量	-5040.83	2430.59	1546.32	38.37	2578.16	-1552.62	

2.2 土地利用变化的碳储量效应

2.2.1 陕西省碳储量时空分布格局 1980—2020年期间,陕西省的碳储量空间分布特征保持了相对稳定的态势。整体来看,森林的综合碳密度最高(约87.92 Mg/hm²),显著高于草地(55.23 Mg/hm²)、农田(46.36 Mg/hm²)和未利用地(54.51 Mg/hm²),而建设用地和水体的碳密度近似为零。这表明森林是区域最重要的碳汇类型,草地和农田也在碳储存中发挥关键作用,而建设用地的扩张会直接导致碳储量损失。

研究区域的碳储量呈现一定的区域差异,其中陕南与陕北南部地区表现出较高的碳储水平,而汉中地区的碳储量相对偏低(图3)。通过分析发现,具有较高碳储量的区域主要分布于草原生态系统以及高海拔的山地森林带,具体包括关山草原、神田草原、黎坪国家森林公园和五龙洞国家森林公园等典型区域。该重点区域的碳储量数值均超过了55.23

Mg/hm²。碳储量次低值区主要集中在汉中平原与陕北北部的农田与其他用地,碳储量最低值区分布零散,主要是流域内的水体以及建设用地。

2.2.2 土地利用变化的碳储量效应 1980—2020年内陕西省碳储量总体上呈下降趋势(图4)。研究结果显示,碳储量从1980年的1 197.51 Tg下降到2020年的1 195.50 Tg。从时间变化来看,1980—2020年土地利用变化共导致2.01 Tg的碳储量损失,其中以2010—2020年这10年间减少量最大,减少量高达3.22 Tg。然而2000—2010年碳储量处于增加趋势,10年间共增加碳储量2.43 Tg,这与“退耕还林”政策的实施密切相关。从各土地利用类型变化来看,林地面积净增2 422.14 km²,其碳储量一直保持持续增长状态,1980—2020年共增加碳储量21.29 Tg,相当于林地扩张每增加1 000 km²就贡献约8.79 Tg碳储量,占全省碳储量增加总量的69.95%。草地碳储量仅在

2010—2020 年出现下降现象,其余时间段一直增加,草地面积在同期增加 1 544.87 km²,总体上 1980—2020 年共增加了碳储量 8.53 Tg,平均每 1 000 km²草地扩张带来约 5.52 Tg 碳储量,占碳储量增加总量的

27.97%。农田碳储量下降最多,仅在 1990—2000 年略有增加,其余时段均在下降,总体上农田碳储量减少了 23.37 Tg;其他用地 1980 年的 32.95 Tg 降至 2020 年的 24.48 Tg,总体下降 8.47 Tg(表 7)。

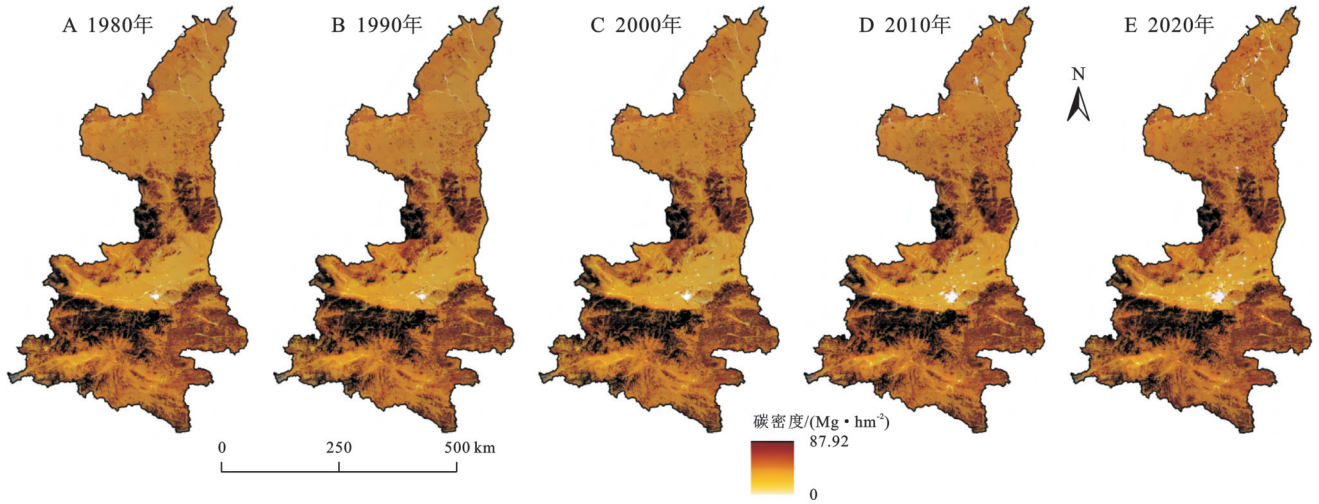


图 3 1980—2020 年陕西省碳储量空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution patterns of carbon storage in Shaanxi Province (1980—2020)

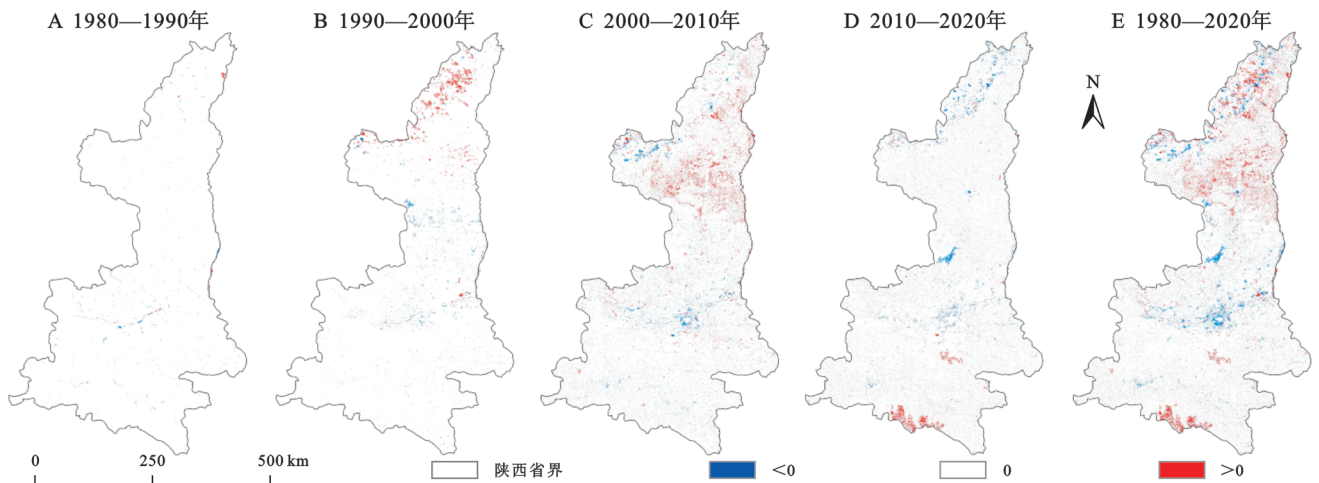


图 4 1980—2020 年陕西省碳储量变化空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of carbon storage changes in Shaanxi Province (1980—2020)

表 7 1980—2020 年陕西省各土地利用类型碳储量及其变化量表

Table 7 Carbon storage and its changes by land use type in Shaanxi Province (1980—2020)

年份	农田	林地	草地	水域	建设用地	其他用地	总碳储量
1980	332.89	405.81	425.85	0.00	0.00	32.95	1197.51
1990	332.65	406.00	425.94	0.00	0.00	32.99	1197.57
2000	333.13	407.73	429.44	0.00	0.00	25.98	1196.29
2010	315.98	422.44	435.63	0.00	0.00	24.67	1198.72
2020	309.52	427.11	434.39	0.00	0.00	24.48	1195.50
1980—1990	-0.25	0.18	0.09	0.00	0.00	0.04	0.06
1990—2000	0.49	1.74	3.50	0.00	0.00	-7.02	-1.29
2000—2010	-17.15	14.71	6.18	0.00	0.00	-1.31	2.43
2010—2020	-6.46	4.67	-1.24	0.00	0.00	-0.18	-3.22
1980—2020	-23.37	21.29	8.53	0.00	0.00	-8.47	-2.01

2.3 土地利用变化对碳储量贡献率的影响
陕西省土地利用变化驱动着区域碳储量的变

化,主要呈现出碳储量增加与碳储量减少两种趋势,即存在正效应与负效应。综合来看,1980—2020 年,

陕西省农田、森林、草地及建设用地之间的转化主导着区域碳储量的变化(图 5)。

从陕西省土地利用变化的负效应来看,建设用地的增加是导致碳储量下降的主要原因(图 5A),近 40 年来陕西省建设用地面积一共增加了 2 578.16 km²,建设用地面积的增长主要是通过侵占农田、草地、森林以及其他用地而来,由这四部分转换为建设用地导致的碳储量下降贡献率达到了 61.08%。其中,农田转化为建设用地导致碳储量下降的贡献率最高,这一转化过程的贡献率达到了 42.28%。除建设用地增加之外,森林转化为草地这一过程也导致了碳储量的下降,贡献率为 13.38%。从陕西省土地

利用变化的正效应来看,森林面积增加是陕西省碳储量增加的主要原因(图 5B),森林面积增加对碳储量增加的贡献率高达 69.95%,其中农田转换为森林和草地转化为森林的贡献率很高,分别为 33.57% 和 34.04%。此外,农田转化为草地也贡献了较高的碳储量,这一转化过程的贡献率为 19.57%。可以看出,当低碳密度的土地利用类型转化为高密度的土地利用类型,特别是碳密度最高的林地时有助于提高生态系统的碳储量,因此,陕西省应当严守“生态保护红线”,谨防其他土地利用类型的侵占林地生态空间,谋划生态系统补偿机制,保障林地生态系统质量、稳定性和碳汇能力稳步提高。

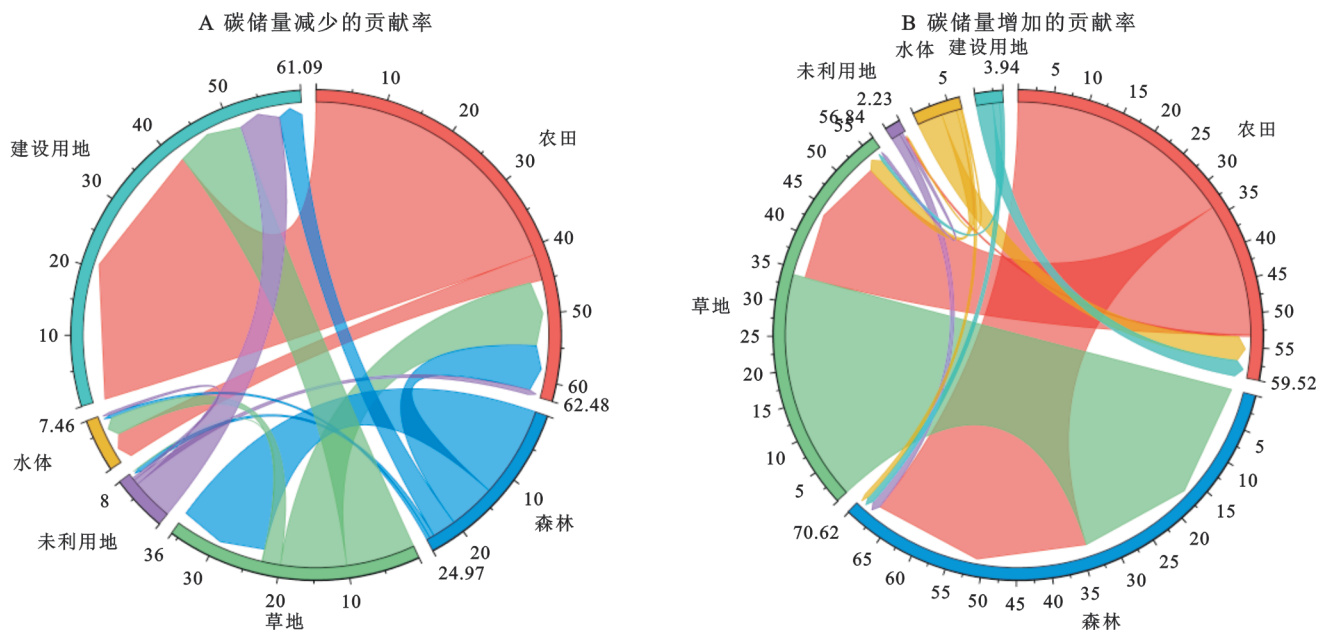


图 5 1980—2020 年陕西省土地利用变化对碳储量的贡献率
Fig. 5 Contribution rates of land use change to carbon storage in Shaanxi Province (1980—2020)

2.4 多情景下碳储量时空变化分析

为评估不同发展路径下土地利用演变对陕西省碳储量的影响(图 6),在此基础上耦合 FLUS 与 InVEST 模型,对 2030 年 3 种情景(自然发展、耕地保护、生态保护)进行模拟与对比(图 7)。

(1) 在总量上存在差距。2030 年全省碳储量在

自然发展情景为 3.165 97×10⁹t,耕地保护情景为 3.131 82×10⁹t,生态保护情景为 3.174 73×10⁹t。以 2020 年为基准,自然发展情景小幅下降 2.69×10⁶t,耕地保护情景下降 3.684×10⁷t,而生态保护情景增加 6.07×10⁶t(表 8)。

表 8 陕西省多情景下不同地类碳储量变化

Table 8 Changes in carbon storage across different land types under multiple scenarios in Shaanxi Province

地类	自然发展情景		耕地保护情景		生态保护情景	
	碳储量/10 ⁶ t	占比/%	碳储量/10 ⁶ t	占比/%	碳储量/10 ⁶ t	占比/%
耕地	848.47	26.80	907.26	28.97	848.58	26.73
林地	1100.84	34.77	1011.13	32.29	1107.88	34.90
草地	1165.96	36.83	1165.96	37.23	1171.67	36.91
水域	0.18	0.01	0.18	0.01	0.18	0.01
建设用地	35.98	1.14	32.76	1.05	31.88	1.00
未利用地	14.53	0.46	14.53	0.46	14.54	0.46

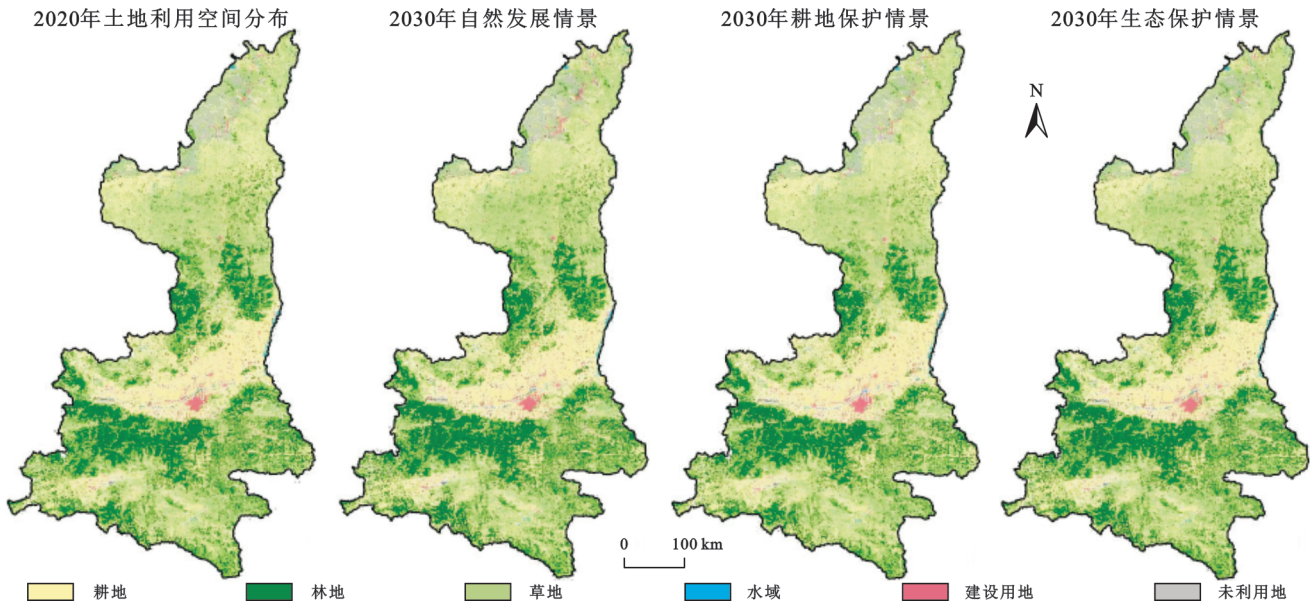


图 6 多情景下陕西省 2030 年土地利用空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of land use in Shaanxi Province under different scenarios in 2030

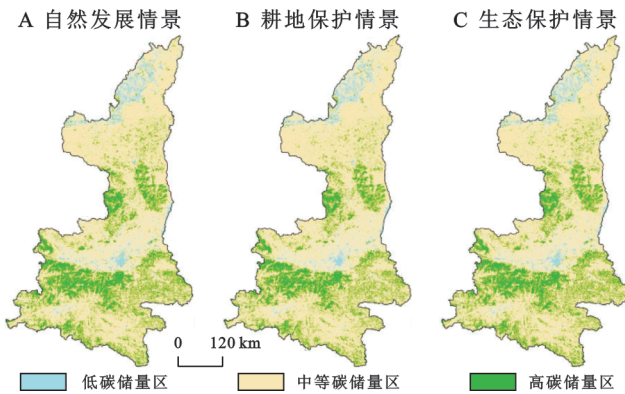


图 7 陕西省 2030 年不同情景碳储量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of carbon storage in Shaanxi Province under different scenarios in 2030

(2) 在驱动因素上,耕地保护情景限制耕地向林地/草地转化,压缩了高碳密度地类(林、草)的扩张空间,因而碳储量降幅最大;自然发展情景保持既有用地演变趋势,林地与草地的缓慢扩张对冲了部分建设用地扩张带来的碳损失,降幅最小;生态保护情景通过约束林地、草地与水域的转化并促进其扩张,使全省碳储量达到三情景最高值。

(3) 在空间格局上,三情景下碳储量空间分布均表现为南高北低的总体格局,但变化热点具有明显分异:关中城市群周边受建设用地外扩影响,在自然发展与耕地保护情景下呈现显著碳损失;陕南秦巴山区与陕北黄土高原区在生态保护情景下林草扩张,成为碳汇增强的主要区域(表 9)。

(4) 在类型贡献上,在 3 种情景中,耕地保护情景的耕地碳储量占比最高(28.97%),耕地面积较 2020 年净增 3 352.80 hm²,但由于林地/草地扩张受限,使全省碳储量总量不升反降;相反,生态保护情

景通过提升林草占比显著改善区域碳汇能力。

表 9 多情景下区域碳储量变化

Table 9 Regional carbon storage changes under multiple scenarios

区域	10 ⁶ t		
	自然发展情景	耕地保护情景	生态保护情景
陕北	1158.04	1149.65	1164.55
关中	831.89	824.43	835.49
陕南	1176.05	1157.74	1174.69
合计	3165.97	3131.82	3174.73

3 讨论与启示

3.1 讨论

InVEST 模型的碳密度参数参考了 2010 年代中国陆地生态系统碳密度数据库^[19]构建。该数据库整合了森林、草地、农田、湿地、灌丛等主要生态系统的碳密度数据,涵盖植被地上与地下碳储量,以及 0—20 cm 表层和 0—100 cm 深层土壤有机碳储量^[23]。针对陕西省各类土地利用方式的碳密度特征,主要通过对相关学者发表文献数据的系统整合与提取获取。在数据筛选过程中,严格执行以下质量控制标准:(1) 所有植物生物量与土壤碳密度数据必须来源于实地监测结果,排除模型模拟与文献统计的间接数据;(2) 采样时间限定为 2000 年以后的实测数据;(3) 不同来源的生物量与土壤碳密度测定方法需保持一致性以确保数据的可比性^[21]。因此 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集具有较高的可信度,它的建立和共享,为区域植被生物量和生态系统碳储量评估,生态系统质量评估,以及模型优化提供了重要参考。然而,不同土地利用类型的碳密度具有时空变异性^[25],该数据集

中陕西省的碳密度数据均来源于2000年之后,因为早期数据获取难度太大,本研究并未考虑不同土地覆被类型碳密度的时间变化,因此对1980—1990年陕西省的碳储量计算不具有较高的代表性。此外,建设用地的碳储量也不为零。为了获得更准确的碳储量数据,有必要进行实地调查并获得现场数据,以便准确计算建设用地和水体的碳储量^[26]。

既有研究表明,全国及流域尺度上耕地减少与建设用地扩张是碳储量下降的主要原因,而退耕还林等生态工程则显著提升了碳汇水平^[9-13]。本研究在陕西省内的结果与之相一致,但进一步揭示了省域尺度上的差异性,如关中平原建设用地扩张对碳储量削减的影响强度高于西北干旱区城市扩张的研究结果^[21],而秦巴山区森林碳汇的增加与贵州、四川等生态恢复区的情形相似^[20],说明生态工程在复杂地形区的增汇效应具有普遍性。此外,本研究通过情景模拟发现,不同政策导向下碳储量变化趋势存在明显分异,这与华北平原及黄河中下游的研究结论相呼应,土地利用规划需因地制宜^[27]。综上,本研究强调了区域差异和政策情景对碳储量演变的调控作用,为全国碳储量效应研究提供了更具代表性的省域案例。

3.2 碳中和愿景下陕西省未来土地利用变化的启示

土地利用变化是影响陆地碳储存与排放的重要因素,及时有效地进行碳储量评估,对区域碳循环和碳源/汇研究和维持区域可持续发展具有重要意义^[23]。近年来,陕西省面临着严重的土地资源冲突,各类土地利用用途之间频繁发生转化,这一过程伴随着的大量温室气体排放,这对陆地生态系统碳汇带来负面影响。为实现经济与环境协同发展的双重目标,陕西省在未来的土地利用规划中应该注重以下几个方面:(1)发展低碳经济,以低碳导向的土地利用结构优化方式为主,适当控制建设用地面积的增加,同时还要确保“基本农田”面积稳定;(2)严格落实“绿水青山就是金山银山”的重要生态理念,加强对高碳密度的林地、草地等区域的生态保护,避免对林草地的破坏,同时实施植树造林、天然林保护等有益于实现陕西省碳增汇的活动^[28];(3)应重视单一用地类型的多功能开发,推动其从单一生产功能向生产—生态复合功能转型。(4)区域土地利用政策应在耕地保护与生态修复之间寻求平衡,在严格管控城镇扩张的同时,加大生态保护和恢复力度,以实现粮食安全与碳中和双重目标。整合自然资源与实施国土整治可有效提升生态保护效能,从而优化土地利用格局,增强碳汇能力,降低碳排量,为达成我国“碳中和”战略目标提供有力支撑。

4 结论

本文以陕西省土地利用变化为切入点,采用1980—2020年5期土地利用数据,结合土地利用动态变化度及转移矩阵对土地利用空间分布格局及演变特征展开研究,同时,利用InVEST-PLUS模型估算了陕西省碳储量变化及其空间格局演化趋势,揭示了陕西省土地利用变化特征及其碳储量效应,得出如下结论:

(1) 1980—2020年陕西省土地利用空间分布格局基本稳定。农田在全省均有分布,森林和草地主要集中于陕南和陕北南部,建设用地主要集中在关中平原,未利用地主要分布在陕北。各用地类型面积变化显著,其中农田面积减少17 294.52 km²,其他用地减少2 423.89 km²;林地、草地、水体和建设用地则分别增加2 422.14 km²,8 468.97 km²,373.11 km²和8 454.19 km²。总体来看,农田面积减少最多,建设用地增加最多,森林面积增加略低于建设用地。主要受陕西省“退耕还林”政策的实施和城市化快速推进的共同影响。

(2) 1980—2020年陕西省碳储量整体呈下降趋势,累计减少2.01 Tg。建设用地扩张是碳储量下降的主要原因,其增长主要以挤占森林、草地和农田等高碳密度用地为代价,导致区域碳储量损耗。

(3) 得益于国家“退耕还林”政策实施,1980—2020年陕西省林地面积净增2 422.14 km²,碳储量增加21.29 Tg,在一定程度上缓解了碳损失。

(4) 多情景模拟下不同发展路径下碳储量演变差异显著。自然发展情景下碳储量缓慢下降,耕地保护情景因抑制林草扩张而下降幅度更大,而生态保护情景下碳储量显著提升,成为唯一实现碳汇增强的路径。应在严格管控建设用地扩张的同时,统筹耕地保护与生态修复,推动林草恢复与合理空间布局优化,以实现粮食安全与生态碳汇双重目标。

参考文献(References):

- [1] 李广东,方创琳.城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析[J].地理学报,2016,71(1):49-65.
Li G D, Fang C L. Quantitative function identification and analysis of urban ecological-production-living spaces [J]. Acta Geographica Sinica, 2016,71(1):49-65.
- [2] Verburg P H, van de Steeg J, Veldkamp A, et al. From land cover change to land function dynamics: a major challenge to improve land characterization [J]. Journal of Environmental Management, 2009,90(3):1327-1335.
- [3] 龚亚男,韩书成,时晓标,等.广东省“三生空间”用地转型的时空演变及其生态环境效应[J].水土保持研究,

- 2020,27(3):203-209.
- Gong Y N, Han S C, Shi X B, et al. Temporal and spatial evolution and associated eco-environment effects of the land use transformation of ecological-production-living spaces in Guangdong Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020,27(3):203-209.
- [4] Liang X Y, Jin X B, Ren J, et al. A research framework of land use transition in Suzhou City coupled with land use structure and landscape multifunctionality [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,737:139932.
- [5] 高扬,何念鹏,汪亚峰.生态系统固碳特征及其研究进展[J]. *自然资源学报*,2013,28(7):1264-1274.
- Gao Y, He N P, Wang Y F. Characteristics of carbon sequestration by ecosystem and progress in its research [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013,28(7):1264-1274.
- [6] 张海凤,崔桂善.土地利用/覆盖类型的变化对陆地生态系统碳收支的影响[J]. *中国资源综合利用*,2019,37(1):176-179.
- Zhang H F, Cui G S. Effects of different land use/cover types on terrestrial ecosystem carbon budgets [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2019, 37 (1) : 176-179.
- [7] Zhu G F, Qiu D D, Zhang Z X, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021,127:107770.
- [8] Calle L, Canadell J G, Patra P, et al. Regional carbon fluxes from land use and land cover change in Asia, 1980—2009[J]. *Environmental Research Letters*, 2016,11(7):074011.
- [9] 曲福田,卢娜,冯淑怡.土地利用变化对碳排放的影响[J]. *中国人口·资源与环境*,2011,21(10):76-83.
- Qu F T, Lu N, Feng S Y. Effects of land use change on carbon emissions [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011,21(10):76-83.
- [10] 王渊刚,罗格平,赵树斌,等.新疆耕地变化对区域碳平衡的影响[J]. *地理学报*,2014,69(1):110-120.
- Wang Y G, Luo G P, Zhao S B, et al. Effects of arable land change on regional carbon balance in Xinjiang [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014,69(1):110-120.
- [11] Alipbeki O, Alipbekova C, Sterenharz A, et al. Analysis of land-use change in shortlandy district in terms of sustainable development[J]. *Land*, 2020,9(5):147.
- [12] Gibas P, Majorek A. Analysis of land-use change between 2012—2018 in Europe in terms of sustainable development[J]. *Land*, 2020,9(2):46.
- [13] 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):111-119,198.
- Zhang S Y, Fan Y F, Yan L, 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):111-119,198.
- [14] 王天福,龚直文,邓元杰.基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J]. *自然资源学报*,2022,37(5):1214-1232.
- Wang T F, Gong Z W, Deng Y J. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi Province based on land use change [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022,37(5):1214-1232.
- [15] 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[J]. *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 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(4):1571-1582.
- [16] 颜建熊,熊万灵,刘亦文,等.生态治理政策对国家重大战略区域生态系统变化的影响:以京津冀地区为例[J/OL]. *生态学报*,2025:1-15.(2025-09-02). <https://link.cnki.net/doi/10.20103/j.stxb.202502150303>.
- Yan J J, Xiong W L, Liu Y W, et al. The impact of ecological governance policies on ecosystem changes in major strategic regions of the country: Take the Beijing-Tianjin-Hebei region as an example [J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025: 1-15. (2025-09-02). <https://link.cnki.net/doi/10.20103/j.stxb.202502150303>.
- [17] Han D, Qiao R L, Ma X M. Optimization of land-use structure based on the trade-off between carbon emission targets and economic development in Shenzhen, China [J]. *Sustainability*, 2019,11(1):11.
- [18] 岳辉,刘英.近15 a陕西省植被时空变化与影响因素分析[J]. *干旱区地理*,2019,42(2):314-323.
- Yue H, Liu Y. Vegetation spatiotemporal variation and its driving factors of Shaanxi Province in recent 15 years [J]. *Arid Land Geography*, 2019,42(2):314-323.
- [19] 徐丽,何念鹏,于贵瑞.2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. *中国科学数据(中英文网络版)*,2019,4(1):90-96.
- Xu L, He N P, Yu G R. Carbon density dataset of china's Terrestrial Ecosystems in the 2010s [J]. *National Ecosystem Science Data Center*, 2019,4(1):90-96.
- [20] 郭椿阳,高建华,樊鹏飞,等.基于格网尺度的永城市土地利用转型研究与热点探测[J]. *中国土地科学*,2016,30(4):43-51.
- Guo C Y, Gao J H, Fan P F, et al. Land use transition and hotspots detection in Yongcheng City based on the grid scale [J]. *China Land Sciences*, 2016,30(4):43-51.
- [21] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China [J]. *Global Change Biology*, 2003,9(3):305-315.