

# 基于多模型的湖北省陆地生态系统 碳储量与生境质量研究

史浩<sup>1,2</sup>, 李玄辉<sup>1,2</sup>, 曾冠中<sup>1,2</sup>, 刘晓静<sup>1,2</sup>, 张伟<sup>1,2</sup>, 茹亮<sup>1,2</sup>, 邢航<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局地球物理调查中心, 河北廊坊 065000;

2. 中国地质调查局地球浅地表探测技术创新中心, 河北廊坊 065000)

**摘要:** [目的] 探究湖北省陆地生态系统碳储量与生境质量的时空演变规律、驱动机制及碳经济价值, 为区域生态保护与绿色低碳发展提供科学依据。[方法] 基于 2010—2023 年土地利用数据, 运用 PLUS 模型模拟 2030 年自然发展、经济发展及综合发展情景下的土地利用格局, 结合 InVEST 模型评估碳储量与生境质量时空分异, 利用地理探测器解析驱动因素, 并通过复利现值法估算碳储量经济价值。[结果] ① 土地利用呈“先扩张后优化”特征, 2020 年后生态政策有效抑制建设用地扩张, 促进林地和水域恢复。② 碳储量表现为“先降后升”, 其空间分布呈现“西高东低”的态势, 坡度、高程及 NDVI 对碳储量空间分布影响程度较强, 社会经济因素影响逐年增大。③ 生境质量整体趋降但局部优化, 低等级生境扩张, 鄂西山地维持高质量, 中部平原受人类活动影响显著。④ 综合发展情景通过生态修复与用地管控, 碳储量经济价值最高 ( $2.69 \times 10^{13}$  元)。[结论] 自然与人文因素协同驱动碳储量与生境质量的变化, 综合发展情景可实现“增汇”与“提质”双赢, 为湖北省生态规划提供科学支撑。

**关键词:** 陆地生态系统; 碳储量; 生境质量; 时空演变

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0247-12

中图分类号: X171.1, X321

**文献参数:** 史浩, 李玄辉, 曾冠中, 等. 基于多模型的湖北省陆地生态系统碳储量与生境质量研究[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 247-258. Shi Hao, Li Xuanhui, Zeng Guanzhong, et al. Carbon storage and habitat quality of terrestrial ecosystems in Hubei Province based on multiple models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 247-258.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.011

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.011

## Carbon storage and habitat quality of terrestrial ecosystems in Hubei Province based on multiple models

Shi Hao<sup>1,2</sup>, Li Xuanhui<sup>1,2</sup>, Zeng Guanzhong<sup>1,2</sup>, Liu Xiaojing<sup>1,2</sup>, Zhang Wei<sup>1,2</sup>, Ru Liang<sup>1,2</sup>, Xing Hang<sup>1,2</sup>

(1. Center for Geophysical Survey, China Geological Survey, Langfang, Hebei 065000, China;

2. Technology Innovation Center for Earth Near Surface Detection, China Geological Survey, Langfang, Hebei 065000, China)

**Abstract:** [Objective] The spatiotemporal evolution, driving mechanisms, and carbon economic value of terrestrial ecosystem carbon storage and habitat quality in Hubei Province were analyzed in order to provide a scientific basis for regional ecological protection and green low-carbon development. [Methods] Based on land use data from 2010 to 2023, this study utilized the PLUS model to simulate land use patterns under natural development, economic development, and comprehensive development scenarios in 2030. The InVEST model was employed to evaluate the spatiotemporal variations of carbon storage and habitat quality. The geodetector was employed to analyze the driving factors, and the present value method was used to estimate the economic value of carbon storage. [Results] ① Land use exhibited a pattern of ‘initial expansion followed by optimization’. After 2020, ecological policies effectively curbed the expansion of construction land and promoted the restoration of

收稿日期: 2025-05-20

修回日期: 2025-07-24

采用日期: 2025-07-28

资助项目: 中国地质调查局项目“国土变更调查国家级外业核查(地球物理中心)”(DD20230528)

第一作者: 史浩(1992—), 男(汉族), 湖北省十堰市人, 工程师, 主要从事自然资源调查监测相关工作。Email: 790277813@qq.com。

通信作者: 李玄辉(1981—), 男(汉族), 河南省周口市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事自然资源调查监测相关工作。Email: Lixuanhui0394@163.com。

forestland and water bodies. ② Carbon storage showed a trend of ‘initial decline followed by rise’, with a spatial distribution of ‘high in the west and low in the east’. Slope, elevation, and NDVI were the primary drivers of the spatial differentiation, and the influence of socioeconomic factors strengthened gradually. ③ Habitat quality declined overall but showed local improvements. Low-quality habitats expanded. The western mountainous areas of Hubei Province maintained high quality, while the central plains were significantly affected by human activities. ④ Under the comprehensive development scenario, the economic value of carbon storage reached the highest value ( $2.69 \times 10^{13}$  yuan) through ecological restoration and land use regulation. [Conclusion] Natural and anthropogenic factors jointly drive the evolution of carbon storage and habitat quality. Under the comprehensive development scenario, a win-win outcome of ‘carbon sink enhancement’ and ‘quality improvement’ can be achieved, thereby providing scientific support for ecological planning in Hubei Province.

**Keywords: terrestrial ecosystems; carbon storage; habitat quality; spatiotemporal evolution**

在全球气候变化背景下,二氧化碳等温室气体的持续累积所引发的全球变暖问题,正以前所未有的速度威胁着人类社会的生存与发展。陆地生态系统作为全球碳循环的重要环节,其碳储量的高低直接影响着大气中二氧化碳的收支平衡,对于缓解气候变暖至关重要。同时,生境质量作为衡量生态系统为生物提供生存与繁衍条件能力的核心指标,不仅关乎生物多样性的维持,更是生态系统服务功能的重要组成部分,二者分别从碳汇调节和生物栖息保障的维度,共同构成了评估生态系统健康与服务功能的关键指标体系,在应对全球气候变化和生态保护实践中受到广泛关注。

近年来,快速城市化引发的土地利用/覆盖变化(LUCC)已成为继化石能源消耗之后影响区域碳平衡的主要驱动因素<sup>[1]</sup>。人类活动的干预,造成林地、耕地等向建设用地无序扩张,导致土地利用类型从高碳储量的自然生态用地向低碳储量的人工用地转变,直接降低了陆地生态系统碳汇能力。同时因生境破碎化、污染加剧等问题,造成生境质量的显著下降。碳储量与生境质量在时空维度上的复杂演变,已成为制约区域可持续发展的重要瓶颈,引发了国内外学者的高度关注<sup>[2-3]</sup>。

在生态系统碳储量与生境质量研究中,早期依赖高成本、低效率的实地调查,而随着技术进步,模型方法生物多样性与生态系统功能关系模型(BEF)、反硝化-分解模型(DNDC)、CASA模型和生态系统服务与权衡的综合评估模型(InVEST)显著提升了精度与空间模拟能力<sup>[4]</sup>;生境质量评估则通过HSI, BCI及InVEST等实现<sup>[5]</sup>。土地利用模拟模型CA-Markov, FLUS和PLUS虽支持多情景预测<sup>[6]</sup>,但存在参数复杂、区域适用性差等局限。InVEST和PLUS模型因操作简便、数据需求低且支持可视化,

成为主流工具。当前研究多聚焦小尺度短周期分析,缺乏对碳储量经济价值的量化及多因子交互作用的深入解析,需进一步结合协同效应研究以支撑区域生态规划。

湖北省作为长江经济带核心生态枢纽,是连接成渝与长三角城市群的“生态桥梁”,且有5个区域被划入中国生物多样性保护优先区域。然而,快速城市化导致自然生态用地向建设用地转换,大量土地资源从自然生态用地向建设用地转换,土地资源的碳汇功能逐渐降低,不合理的土地资源利用方式使得生态环境受损问题日益显现<sup>[7]</sup>。截至2024年,湖北省林地面积约 $9.27 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,森林覆盖率42.45%,每1 hm<sup>2</sup>蓄积量63.34 m<sup>3</sup>,低于全国平均水平,森林质量提升潜力巨大。

本研究以湖北省为研究区域,聚焦于解决该地区经济发展与生态保护之间的突出矛盾。以2010—2023年土地转移矩阵为基础,运用PLUS模型对2030年土地利用类型进行预测,在此基础上进一步结合中央银行的贴现率和湖北省碳排放权交易中心的碳价格,利用复利现值公式估算碳储量经济价值变化趋势,并结合InVEST模型深入分析湖北省碳储量与生境质量在时空维度上的演变特征,进一步借助地理探测器模型探究其主要驱动因素,旨在为制定针对性的生态保护与低碳发展政策和提高区域生态经济价值提供科学依据。

## 1 研究区概况和数据来源

### 1.1 研究区概况

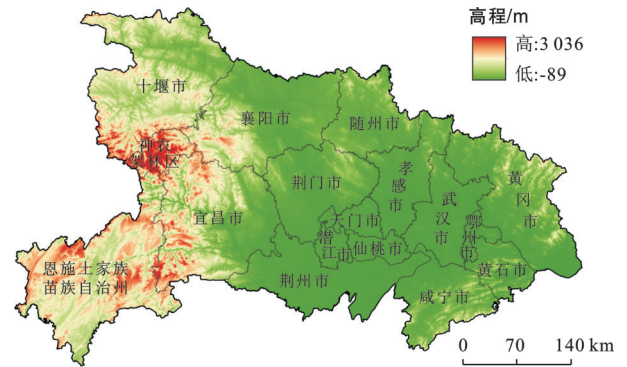
湖北省位于秦岭-淮河以南,与安徽、重庆、河南、湖南毗邻,整体呈东西长条状分布(图1)。其地理坐标为29°01′—33°06′N, 108°21′—116°07′E,全省面积 $1.86 \times 10^5$  km<sup>2</sup>,约占全国总面积的1.94%。该省地形

呈现西高东低之势,且三面环山。西部坐拥巫山、武当山等山脉。在城市化、工业化等人类活动影响下,湖北省面临的生态环境恶化、生态空间萎缩等区域生态问题,在全国范围内具有较强的典型性与代表性<sup>[8]</sup>。

### 1.2 数据来源

本研究采用湖北省 2010, 2020, 2023 年土地利用数据,同时纳入自然因素、社会经济、可达性数据(表 1)。为统一地理空间参考系,将原始数据投影坐标系转为 WGS1984 UTMZone\_50 N,消除地理定位偏差;为满足精细化分析,利用重采样技术,将各类栅格数据输出像元大小统一为 100 m×100 m。时间选择上,2010—2020 年的时间跨度能有效捕捉快速城市化阶段的累积效应,而 2020—2023 年的短周期分析能够凸显政策干预的即时响应,二者结合可

为评估人类活动与生态保护的博弈提供有效观测窗口。



注:本图基于审图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图 1 湖北省行政区划及地形图  
Fig.1 Administrative divisions and topographic map of Hubei Province

表 1 研究数据主要信息与来源

Table 1 Main information and sources of research data

类型	数据	描述
LUCC	LUCC 数据集	武汉大学杨杰和黄昕教授团队发布的中国土地覆盖数据提供的 30 m 分辨率土地利用覆被数据 <a href="https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810">https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810</a>
	夜间灯光	<a href="https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/YGIVCD">https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/YGIVCD</a>
社会经济数据	人口	LandScan 人口数据集 ( <a href="https://landscan.ornl.gov/">https://landscan.ornl.gov/</a> )
	GDP	中国科学院资源与环境科学与数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
	到铁路距离	
可达性数据	到快速路距离	
	到主干道距离	OpenStreetMap ( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )
	到次干道距离	
	到城市中心距离	
	到河流距离	OpenStreetMap ( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )
自然环境数据	NDVI	国家生态科学数据中心 ( <a href="https://www.nesdc.org.cn/">https://www.nesdc.org.cn/</a> )
	年平均温度	
	年平均降雨量	国家青藏高原科学数据中心 ( <a href="http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/">http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/</a> )
	高程	
	坡度	地理空间数据云 ( <a href="http://www.gscloud.cn/sources/accessdata/310pid=1">http://www.gscloud.cn/sources/accessdata/310pid=1</a> )

## 2 研究方法

### 2.1 Invest 模型

#### 2.1.1 碳储量计算

InVEST 模型凭借土地利用栅格图与四大碳库,能够精准定量估算区域碳储量,助力分析不同时期碳储量的动态变化,当前在国家、区域和流域等多个尺度的生态功能区划、生态保护红线划定、生态修复和资源环境承载力评估等方面得到应用。其计算基于各类土地利用类型对应固定总碳密度的假设。该

总碳密度由地下生物量碳密度、地上生物量碳密度、死亡有机质碳密度以及土壤有机质碳密度构成。计算公式<sup>[9]</sup>为

$$C_i = C_{i_{above}} + C_{i_{below}} + C_{i_{dead}} + C_{i_{soil}} \quad (1)$$

$$C_{i_{total}} = C_i \times S_i \quad (2)$$

式中: $C_{i_{total}}$ 为研究区总碳储量, $C_i$ 为地类*i*的总碳密度; $C_{i_{above}}$ 为地类*i*地上生物量碳密度; $C_{i_{below}}$ 为地类*i*地下生物量碳密度; $C_{i_{soil}}$ 为地类*i*土壤有机质碳密度; $C_{i_{dead}}$ 为地类*i*死亡有机质碳密度; $S_i$ 为地类*i*的面积。

为确保碳密度数据的一致性与准确性,在数据选取过程中,采用湖北省本地实测数据,若湖北省实测数据缺失,则选用邻近纬度区域的实测数据,或参

考相关文献中整理的既有研究数据。本研究湖北省各地类碳密度数据主要源自何青松等<sup>[8]</sup>关于该区域碳密度的汇总成果(表 2)。

表 2 湖北省土地覆盖类型碳密度  
Table 2 Carbon density of land cover types in Hubei Province

单位:t/hm<sup>2</sup>

地类	地上生物量碳密度	地下生物量碳密度	土壤有机质碳密度	死亡有机质碳密度	数据来源
耕地	4.02	0.75	2.11	98.13	Chuai等 <sup>[9]</sup>
林地	22.62	18.03	2.78	126.75	Chuai等 <sup>[9]</sup>
草地	3.60	11.70	7.28	90.43	Chuai等 <sup>[9]</sup>
水域	1.59	0	3.98	64.03	朱耀军等 <sup>[10]</sup>
建设用地	0.83	0.08	0	43.71	柯新利等 <sup>[11]</sup>
未利用地	0.59	0.64	0.96	28.42	柯新利等 <sup>[11]</sup>

### 2.1.2 生境质量计算

选用 InVEST 模型的 Habitat Quality 模块衡量湖北省的生境质量水平。生境质量退化程度和生境质量的取值范围均为 0~1,一个地区的生境质量越好,其得分越高;而生境退化程度越高,得分越低。生境质量水平的结果划分为 5 个等级:(0,0.2);[0.2,0.4);[0.4,0.6);[0.6,0.8)和[0.8,1),分别代表低、较低、一般、较高和高水平<sup>[12]</sup>。计算公式<sup>[13]</sup>为

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left( \frac{\omega_r}{\sum_{v=1}^R \omega_v} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (3)$$

式中: $D_{xj}$ 表示地类 $j$ 中栅格单元 $x$ 的生境退化程度; $r$ 代表威胁层; $R$ 代表威胁因子的数量; $y$ 代表威胁因子的栅格层; $x$ 代表生境中的栅格数量; $Y_r$ 代表 $r$ 的栅格地图上的栅格单元集合; $\omega_r$ 表示栅格单元的每个威胁 $r$ 的权重; $\beta_x$ 是栅格 $x$ 的可达性水平; $S_{jr}$ 表示地类 $j$ 对威胁因子 $r$ 的敏感性; $i_{rxy}$ 表示栅格 $x$ 与 $y$ 之间的距离。具体计算公式如下:

$$i_{rxy} = 1 - \left( \frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{线性衰退}) \quad (4)$$

$$i_{rxy} = \exp \left[ - \left( \frac{2.99}{d_{rmax}} \right) d_{xy} \right] \quad (\text{指数衰退}) \quad (5)$$

式中: $d_{xy}$ 表示栅格 $x$ 和 $y$ 之间的线性距离; $d_{rmax}$ 表示威胁因子的最大作用距离。公式(4)和公式(5)分别为线性距离衰减函数和指数距离衰减函数。

$$Q_{xj} = H_j \left( 1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \quad (6)$$

式中: $Q_{xj}$ 表示地类 $j$ 中地块 $x$ 的生境质量; $k$ 是半饱和常数; $H_j$ 表示地类 $j$ 的生境适宜性; $z$ 表示归一化常数。

InVEST 模型中的生境质量模块主要包括威胁

因子数据和威胁源数据,即生境质量影响因素。由于耕地、公路、农村居民点、工业用地、铁路、建设用地等区域人类活动频繁,威胁因子(耕地、建设用地等)的选择依据为人类活动强度与生态干扰的关联性<sup>[14-15]</sup>,故将上述土地类型设定为威胁因子。参照 IVEST 模型的实例以及 Yang Qiangqiang 等<sup>[16]</sup>的研究成果,结合包玉斌等<sup>[17]</sup>、钟莉娜等<sup>[18]</sup>、严莉等<sup>[19]</sup>对威胁因子与权重赋值的分析,并根据保护区的实际情况及专家建议,对威胁因子及其权重进行科学赋值,具体见表 3 和表 4。

表 3 湖北省生境质量威胁因子的数据  
Table 3 Data of threat factors for habitat quality in Hubei Province

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰减线性相关性
耕地	4	0.6	线性
建设用地	8	0.4	指数
未利用地	6	0.5	线性

表 4 土地利用类型生境适宜性对不同威胁源的敏感性  
Table 4 Sensitivity of habitat suitability of land use types to different threat sources

土地利用类型	生境适宜度	敏感性		
		耕地	建设用地	未利用地
耕地	0.3	0	0.8	0.4
林地	1	0.6	0.75	0.2
草地	0.8	0.8	0.6	0.6
水域	0.7	0.5	0.4	0.2
建设用地	0	0	0	0.1
未利用地	0.6	0.6	0.4	0

## 2.2 PLUS 模拟未来多情景土地利用方式

以 2010 年和 2020 年湖北省土地利用数据为基础,运用 PLUS 模型模拟 2020 年土地利用类型空间分布,经与实际数据对比,模拟结果的 kappa 系数达 85.92%,总体精度为 91.98%,验证了模型的可靠性。

在此基础上,研究结合 2023 年土地利用现状,纳入自然条件、社会经济及可达性等驱动因素(表 1),结合土地利用需求和邻域权重(根据土地利用类型扩展面积占总土地扩展面积的比例计算<sup>[16]</sup>)等参数(表 5 和表 6),对 2030 年自然发展、经济发展和可持续发展 3 种情景下的土地利用变化进行模拟推演,以期为区域土地规划与生态保护提供科学依据。

(1) 自然发展情景(Q<sub>1</sub>)。该情景以 2010—2020 年湖北省土地利用变化的实际数据为基础,假设未来土地利用转移遵循过去十年的自然演变规律,不施加额外的政策干预或人为调控,借助 Markov 链预测 2035 年各地类的需求数量并作为 PLUS 模型中的用

地需求参数。该情景是一种理论上的发展场景,也是其他场景的对照基础。

(2) 经济发展情景(Q<sub>2</sub>)。湖北省作为中部经济大省,若以经济增长为首要目标,建设用地需求将显著增加。情景中提高未利用地、耕地、林地、水域向建设用地的转移概率,核心依据是“经济发展对土地资源的挤占效应”。未利用地因开发成本低,向建设用地转移的概率增幅最大(80%);耕地因分布于地势平坦区域,与城市扩张、工业用地需求重叠,转移概率增加 30%;林地和水域受生态保护限制相对较强,但经济压力下仍可能存在局部开发(如基础设施建设),故转移概率增加 20%。

表 5 2020—2030 年湖北省不同情境下土地利用转移矩阵

Table 5 Land use transition matrix under different scenarios in Hubei Province (2020—2030)

地类	自然发展(Q <sub>1</sub> )						经济发展(Q <sub>2</sub> )						综合发展(Q <sub>3</sub> )					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
林地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
草地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
水域	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
建设用地	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1
未利用地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

(3) 综合发展情景(Q<sub>3</sub>)。该情景以“生态保护、耕地保护与经济发展协调”为目标,核心依据是国家及湖北省相关政策对土地利用的调控要求,如“耕地红线保护”“长江经济带生态修复”“国土空间规划中的生态保护红线”等。将耕地、林地和水域向建设用地转移的概率分别降低 30%,40% 和 60%,未利用地向耕地和草地转移的概率增加 20%,体现对生态敏感区和粮食生产功能区的保护力度,其中水域生态价值高,保护力度最大(转移概率降低 60%)。

均归一化植被指数、高程、坡度等因子对碳储量空间分异的解释能力,以  $q$  值作为衡量指标;交互探测器则用于分析不同因子组合后的交互效应,即组合因子对因变量的解释力是增强、削弱还是保持独立。

2.4 碳储量价值估算

碳储量价值是指生态系统在吸收与储存碳的过程中所具有的经济价值,它反映了生态系统在碳循环方面的潜在经济效益<sup>[21]</sup>。计算公式为:

$$P_{\text{value}} = \sum_{n=1}^n C_n \times P_n \tag{7}$$

$$P_n = T \times (P/T, d, n) \tag{8}$$

式中: $P_{\text{value}}$  为总碳储量经济价值; $C_n$  为第  $n$  期碳储量; $P_n$  为第  $n$  期碳交易价格; $(P/T, d, n)$  为复利现值系数; $d$  为贴现率; $n$  为期数。为消除通货膨胀等因素对碳储量经济价值评估的干扰,本研究使用复利现值法,以全国碳排放权交易中心公布的 2024 年平均碳交易价格为基础,计算得出各期每 1 t 碳交易价格(表 7)。

表 6 邻域权重设置

Table 6 Neighborhood weight settings

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
邻域权重	0.430	0.344	0.005	0.078	0.142	0.001

2.3 地理探测器

地理探测器模型由王劲峰等人<sup>[20]</sup>提出,是量化空间分异和识别驱动因素的重要工具。其核心在于因变量空间分层与自变量对应时存在的驱动关系。该软件可从官方网站(<http://www.geodetector.cn/>)获取。其中,因子探测器用于探究人类活动强度、年

表 7 2010—2030 年碳交易价格

Table 7 Carbon trading prices during 2010—2030

项目	2010 年	2015 年	2020 年	2030 年
碳交易价格/(元·t <sup>-1</sup> )	60.9	70.9	81.8	109.3

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用时空变化特征

2010—2023年,湖北省土地利用格局呈现显著的阶段性转型特征(图2)。2010—2020年,受武汉城市圈快速城市化驱动,耕地净减少 $13.64 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,主要转化为林地(生态退耕)与建设用地(城市扩张),其中88.57%的建设用地增量源于耕地转出,反映出城市化进程对土地资源的强烈需求。同期水域向建设用地转移 $1.32 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,主要用于道路、港口等基础设施建设。此阶段建设用地年均复合增长率达3.42%,以增量扩张为主要特征。

2020—2023年,随着《湖北省国土空间规划(2021—2035年)》实施及长江大保护工程推进,土地利用模式转向存量优化与生态提质。耕地转出量显著下降,通过水域与未利用地整治实现净补充 $8.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ;林地面积稳定在 $8.90 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,"精准灭荒"工程推动生态修复从规模扩张转向质量提升;水域面积净增 $2.19 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,得益于湿地保护政策;建设用地扩张放缓,年均复合增长率降至2.28%,存量用地优化占比提升。至2023年,基本形成"耕地主导、建设用地集聚、生态用地分区保护"的空间格局。

#### 3.2 碳储量时空演变及驱动因素

研究结果(表8)表明,2010—2023年,湖北省碳

储量呈"先降后升"的变化趋势。2010—2020年因建设用地扩张,耕地、林地减少,缺乏系统性生态管控政策,导致高碳储量的耕地、林地被侵占,碳储量从2 483.95 Tg降至2 476.48 Tg;2020—2023年,伴随长江大保护及长江岸线生态修复等政策的实施,通过严格管控生态用地转换,促使林地、水域面积增加,碳储量回升至2 481.86 Tg。2030年情景模拟显示,综合发展情景碳储量高于自然发展和经济发展情景,表明生态保护与土地利用管控对碳储量维持的重要性。

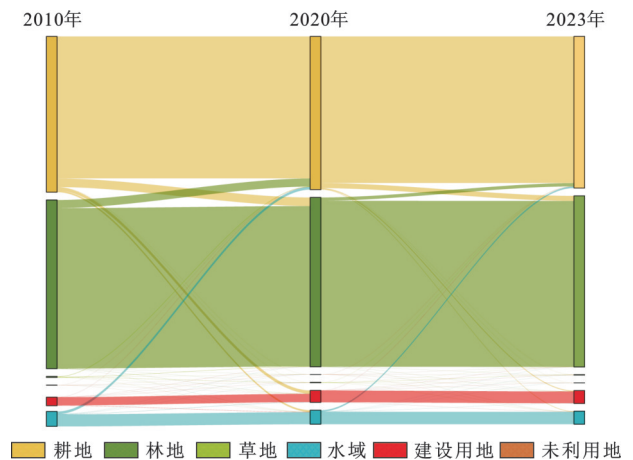


图2 湖北省2010—2023年土地利用类型转移桑基图

Fig.2 Sankey diagram of land use type transitions in Hubei Province during 2010—2023

表8 2010—2030年湖北省不同土地利用类型碳储量

Table 8 Carbon storage of different land use types in Hubei Province during 2010—2030

项目	碳储量/Tg						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总和
2010年	872.05	1 530.40	5.62	55.51	20.36	0.02	2 483.95
2020年	857.73	1 535.99	2.01	52.25	28.50	0.01	2 476.48
2023年	848.92	1 552.00	1.98	48.48	30.48	0.01	2 481.86
2030年自然发展	842.60	1 538.31	1.85	49.85	35.92	0.01	2 468.54
2030年经济发展	837.52	1 537.57	1.81	49.66	38.42	0.01	2 464.98
2030年综合发展	847.79	1 539.31	1.84	50.31	33.16	0.01	2 472.42

在空间上,武汉、宜昌等城市化区域因建设用地侵占高碳储量地类,碳储量显著下降(图3,图4)。鄂西北山区、神农架等生态工程实施区,因林地扩张碳储量增加。西部山区凭借高植被覆盖成为主要碳汇区,呈现“西高东低”的空间分异特征。

通过地理探测器进行单因子探测,能深入剖析各因素对湖北省碳储量空间分异的影响程度。从表9可知,坡度、高程、归一化植被指数对碳储量空间

分布影响程度较强,其中坡度在2010—2023年对碳储量空间分异的解释力始终最强, $q$ 值均在0.86以上且排序相对稳定。夜间灯光指数、经济生产总值、土壤类型等变量相较于其他变量影响程度较低。

地理探测器交互因子(图5)与单因子探测结果对比表明,所有交互探测结果均呈现出双因子增强或非线性增强的特征。以年降雨量( $x_7$ )为例,其单因子探测时对碳储量空间分布的影响相对有限(2023年

$q$  值为 0.108 1), 但与人口密度 ( $x_1$ )、夜间灯光指数 ( $x_4$ )交互时均呈现明显的非线性增强,  $q$  值分别达到 0.51 和 0.30。这表明在特定因子组合条件下, 各因子对碳储量空间分布的影响被强化。相较于单因子作

用, 双因子交互作用对碳储量空间分布的影响更为显著, 凸显出各因素交互作用在碳储量空间分异格局形成中具有重要作用, 揭示了碳储量变化机制中多因子发挥重要协同作用。

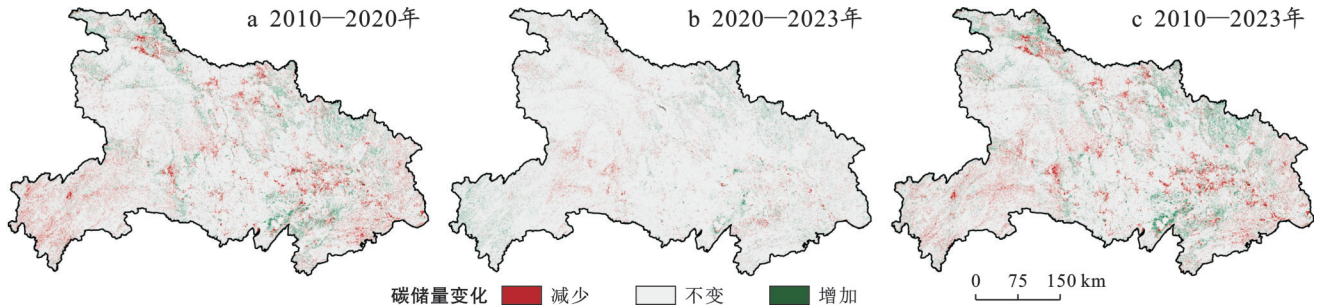


图 3 2010—2023 年湖北省碳储量空间变化

Fig.3 Spatial changes in carbon storage in Hubei Province during 2010—2023

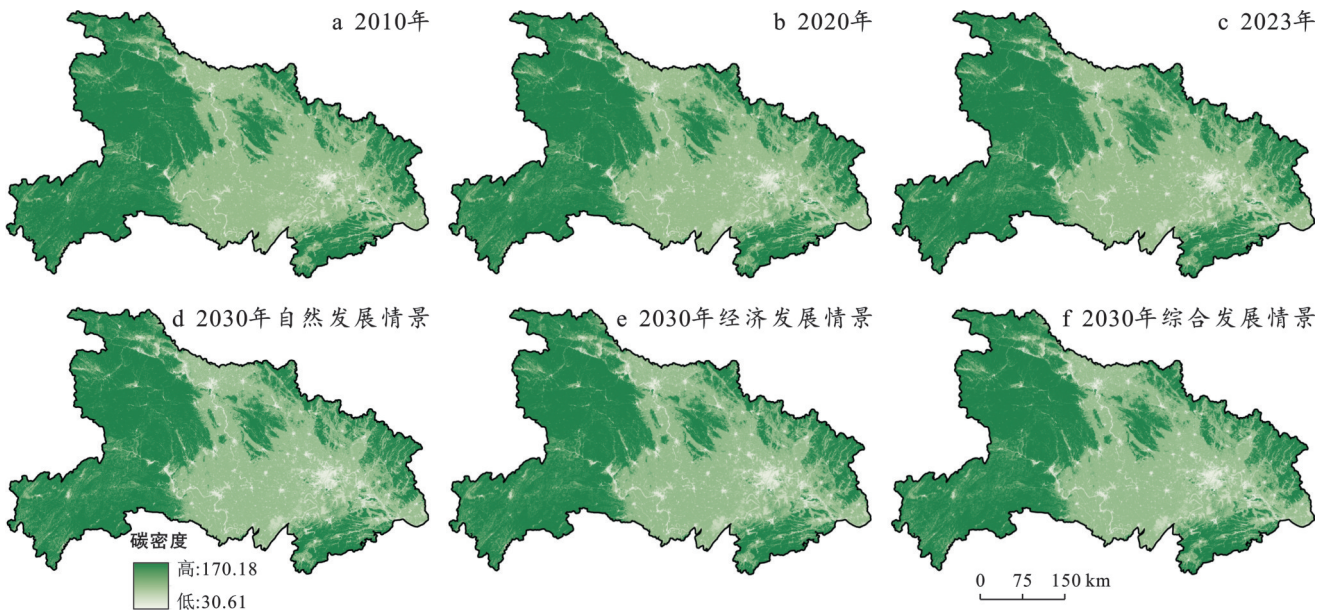


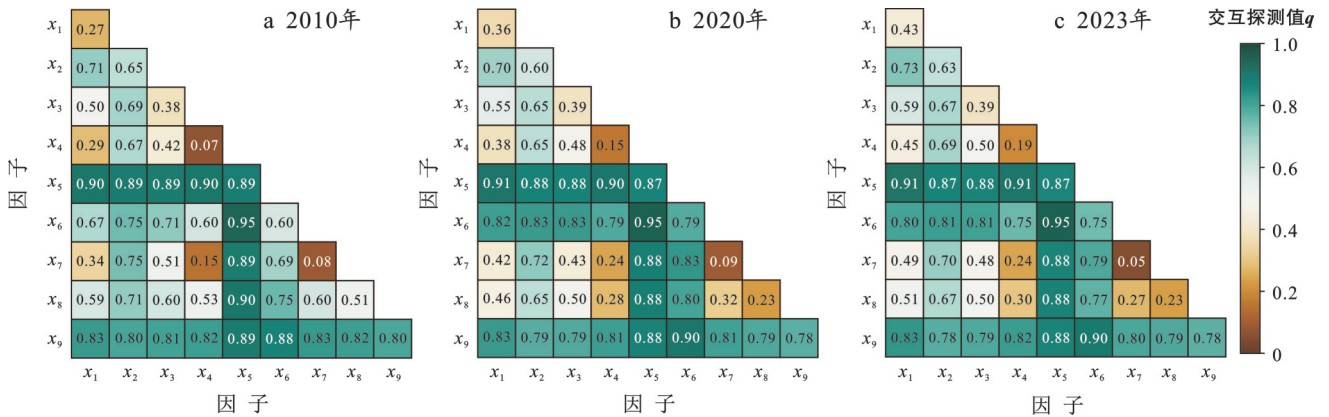
图 4 2010—2030 年湖北省不同发展情景碳储量空间分布及预测

Fig.4 Spatial distribution and prediction of carbon storage under different development scenarios in Hubei Province during 2010—2030

表 9 2010—2023 年湖北省不同年份碳储量单因子探测结果

Table 9 Results of single-factor detection for carbon storage in Hubei Province during 2010—2023

控制因子	2010 年		2020 年		2023 年		2010—2023 年	
	$q$ 值	排序	$q$ 值	排序	$q$ 值	排序	$q$ 值	排序
人口密度( $x_1$ )	0.27	7	0.36	6	0.43	5	0.44	6
年均气温( $x_2$ )	0.65	3	0.60	4	0.63	4	0.65	4
土壤类型( $x_3$ )	0.38	6	0.39	5	0.39	6	0.39	7
夜间灯光指数( $x_4$ )	0.07	9	0.15	8	0.19	8	0.18	8
坡度( $x_5$ )	0.89	1	0.87	1	0.87	1	0.88	1
归一化植被指数( $x_6$ )	0.60	4	0.79	2	0.75	3	0.78	3
年降雨量( $x_7$ )	0.08	8	0.09	9	0.05	9	0.11	9
经济生产总值( $x_8$ )	0.51	5	0.23	7	0.23	7	0.53	5
高程(DEM)( $x_9$ )	0.80	2	0.78	3	0.78	2	0.79	2



注:图中各因子名称见表9。下同。

图5 2010—2023年湖北省不同年份碳储量交互探测结果

Fig.5 Results of interaction detection for carbon storage in Hubei Province by year (2010—2023)

3.3 生境质量时空分异特征

2010—2023年,湖北省生境质量呈现低等级扩张,高等级缩减,较高等级提升的分化趋势(表10)。低等级生境面积从4 562.01 km<sup>2</sup>增至6 830.41 km<sup>2</sup>,比例由2.45%升至3.67%,空间分布上集中于武汉城市圈和江汉平原耕地集中区;较高等级生境因退耕还林、矿山修复等工程,面积增至5.59×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,比例达30.05%;高等级生境因耕地保护与气候变化影响,比例降至19.27%。整体平均生境质量指数从0.534降至0.521,虽然呈下降趋势,但该过程并非匀速进行,而是呈现出显著的阶段性特征。具体而言,2010

—2020年年均下降率为0.02%,而2020—2023年年均下降率达到0.37%,后期下降速度达到前期的16倍,揭示了生境质量恶化呈加速趋势,并非简单的线性下降。

空间分布上(图6),生境质量呈现“西高东低、山高平原低”的特征。鄂西山地作为生态屏障,维持高生境质量;中部江汉平原及城市带因人类活动集中,生境质量较差。情景模拟显示(表11),综合发展情景通过生态修复与开发管控,低生境质量比例降至4.00%,高等级生境区得以稳固,空间分布更趋均衡。

表10 2010—2023年湖北省生境质量等级面积的比例

Table 10 Area proportions of habitat quality grades in Hubei Province during 2010—2023

生境质量等级	2010年		2020年		2023年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
低	4.56×10 <sup>3</sup>	2.45	6.39×10 <sup>3</sup>	3.43	6.83×10 <sup>3</sup>	3.67
较低	8.31×10 <sup>4</sup>	44.65	8.17×10 <sup>4</sup>	43.92	8.109×10 <sup>4</sup>	43.47
中等	7.42×10 <sup>3</sup>	3.99	7.106×10 <sup>3</sup>	3.79	6.56×10 <sup>3</sup>	3.53
较高	4.63×10 <sup>4</sup>	24.89	5.43×10 <sup>4</sup>	29.18	5.59×10 <sup>4</sup>	30.05
高	4.47×10 <sup>4</sup>	24.02	3.66×10 <sup>4</sup>	19.67	3.59×10 <sup>4</sup>	19.27

表11 2023年不同情境下湖北省生境质量等级面积的比例

Table 11 Area proportion of habitat quality grades in Hubei Province under different scenarios in 2023

生境质量等级	自然发展		经济发展		综合发展	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
低	8.11×10 <sup>3</sup>	4.33	8.61×10 <sup>3</sup>	4.63	7.43×10 <sup>3</sup>	4.00
较低	8.10×10 <sup>4</sup>	43.15	7.98×10 <sup>4</sup>	42.88	8.11×10 <sup>4</sup>	43.41
中等	6.74×10 <sup>3</sup>	3.62	6.69×10 <sup>3</sup>	3.60	6.79×10 <sup>3</sup>	3.65
较高	5.47×10 <sup>4</sup>	29.39	5.48×10 <sup>4</sup>	29.45	5.47×10 <sup>4</sup>	29.39
高	3.63×10 <sup>4</sup>	19.51	3.62×10 <sup>4</sup>	19.44	3.64×10 <sup>4</sup>	19.56

不同年份单因子探测结果(表12)表明,2010—2023年,坡度对湖北省生境质量的影响始终居首,各

年份及综合期q值均为最高,高程次之。夜间灯光指数、年降雨量等因子q值相对较低,对生境质量影响

较小。整体而言,地形相关因子(坡度、高程)在生境质量影响中起主导作用,凸显自然地理条件的关键作用,部分人文因子(如人口密度、经济生产总值)的

影响亦随时间变化,反映出自然与人文因素对生境质量的综合影响,表现出与碳储量空间分异的影响程度一致的特征。

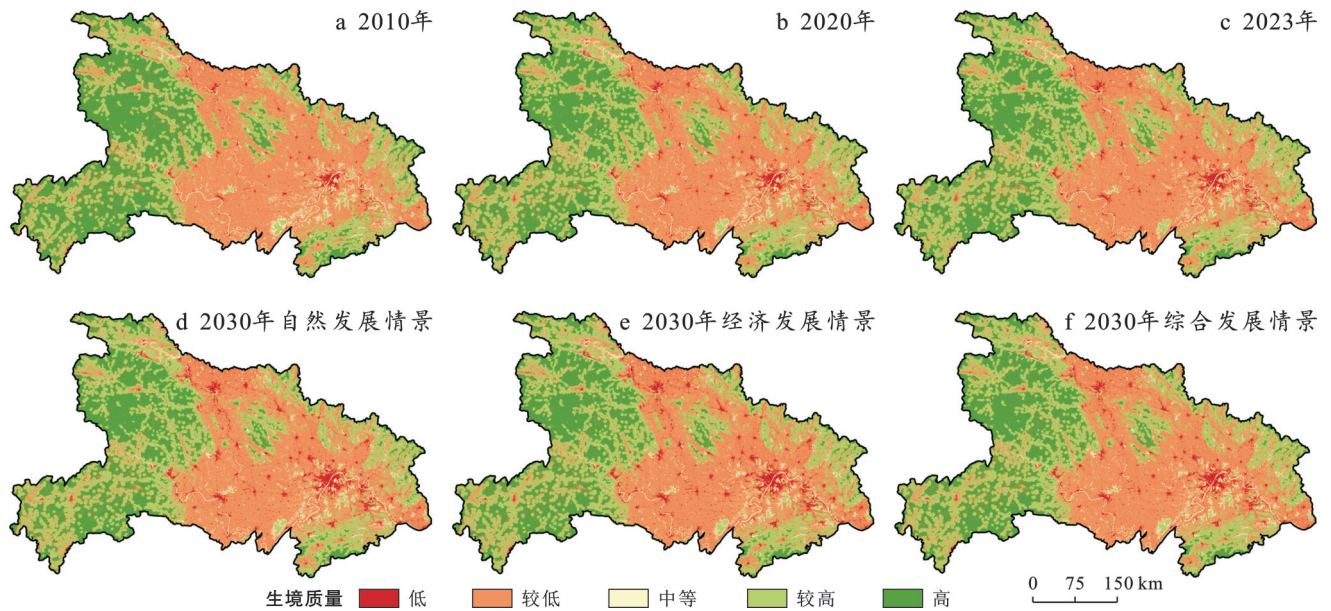


图 6 2010—2030 年湖北省不同发展情景生境质量的空间分布及预测

Fig.6 Spatial distribution and prediction of habitat quality under different development scenarios in Hubei Province during 2010—2030

表 12 湖北省不同年份生境质量单因子探测结果

Table 12 Results of single-factor detection for habitat quality in Hubei Province by years

控制因子	2010年		2020年		2023年		2010—2023年	
	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序
人口密度( $x_1$ )	0.30	7	0.38	6	0.45	5	0.49	6
年均气温( $x_2$ )	0.68	3	0.64	4	0.67	4	0.68	4
土壤类型( $x_3$ )	0.38	6	0.39	5	0.40	6	0.39	7
夜间灯光指数( $x_4$ )	0.04	9	0.12	8	0.15	8	0.14	8
坡度( $x_5$ )	0.84	1	0.83	1	0.83	1	0.84	1
归一化植被指数( $x_6$ )	0.57	4	0.74	3	0.72	3	0.76	3
年降雨量( $x_7$ )	0.08	8	0.09	9	0.04	9	0.09	9
经济生产总值( $x_8$ )	0.48	5	0.19	7	0.19	7	0.50	5
高程(DEM)( $x_9$ )	0.79	2	0.77	2	0.78	2	0.79	2

地理探测器交互因子(图 7)与单因子探测结果的对比分析表明,因子交互后的 q 值普遍高于单因子,呈现出显著的协同增强效应(如坡度与归一化植被指数的交互),且所有交互组合均表现出双因子增强或非线性增强的特征。其中,坡度与其他各项因子的交互作用最大,年降雨量与土壤类型、夜间灯光指数交互影响均呈明显的非线性增强,表明生境质量并非单一因子影响,而是地形、气候、植被等多因子综合作用的结果。

### 3.4 碳储量经济价值估算

2010—2020 年,湖北省碳储量经济价值从

$1.51 \times 10^{11}$  元增至  $2.03 \times 10^{11}$  元,年均增长率为 3.02%。耕地(32.11%)和林地(34.81%)为主要增长贡献者(图 8)。2030 年不同情景中,综合发展情景总价值最高,经济发展情景因建设用地扩张导致生态用地减少,价值略低。耕地与林地各情景中均为核心价值载体,反映其在区域碳汇中的关键作用。值得注意的是,水域碳价值增速最快(年均 4.10%),反映了湿地保护工程对碳汇功能的强化作用。

## 4 讨论

本研究表明,湖北省土地利用变化对碳储量与

生境质量的影响呈现显著的阶段性特征。前期城市化驱动的建设用地扩张是碳储量下降和生境质量退化的主要原因,与 Xue<sup>[22]</sup>等(2023)关于土地利用/覆盖变化影响区域碳平衡的研究结论一致。后期生态保护政策有效遏制了生态用地流失,促进了碳储量

回升和生境质量局部优化,印证了政策干预在生态修复中的关键作用<sup>[23]</sup>。同时,湖北省生境质量呈现“西高东低”格局,鄂西山地因人类干扰少、植被覆盖高,维持高生境质量,而中部平原及城市带受开发活动影响,生境退化明显。

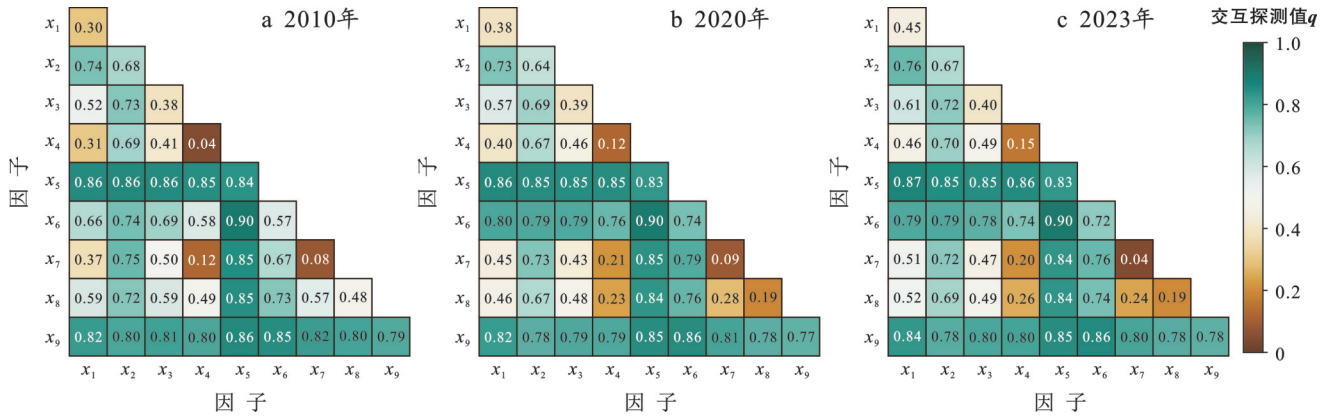


图7 湖北省不同年份生境质量交互探测结果

Fig.7 Results of interaction detection for habitat quality in Hubei Province by years

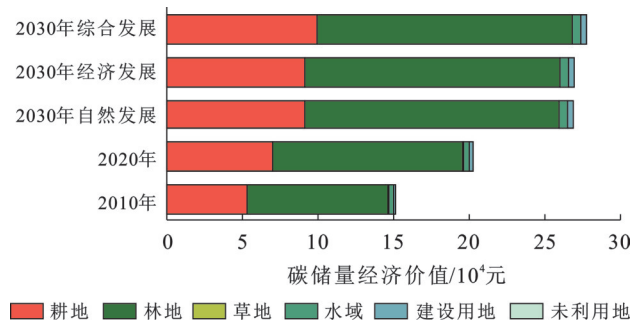


图8 2010—2030年湖北省各地类碳储量经济价值

Fig.8 Economic value of carbon storage by land use type in Hubei Province during 2010—2030

不同发展情景模拟进一步揭示了碳储量与生境质量变化间的复杂协同关系。经济发展情景下,生态用地向建设用地转移,引发碳储量下降与生境质量大范围退化,表明碳汇损失与生境破坏存在权衡关系,可能造成生态系统服务功能双重退化;综合发展情景则展现出协同增效潜力,通过严格管控用地转化和生态修复,实现碳储量提升与生境压力缓解,印证了优化土地利用结构和强度管理<sup>[24]</sup>,可达成“增汇”与“提质”双赢,这种协同效应在政策加强期已显现,需在未来规划中进一步深化。自然发展情景下,碳储量与低等级生境扩张趋势表明,缺乏政策干预将导致区域生态系统陷入“碳汇缓慢下降—生境质量渐进退化”状态。此外,经济发展情景中,建设用地扩张导致林地、耕地碳价值分别下降0.5%和0.8%,印证了“经济增长—生态透支”的权衡关系。自然发展情景下,碳价值增速趋缓(年均2.3%),凸显

政策干预对碳汇经济价值维持的必要性。

地理探测器分析显示,坡度、高程、NDVI等自然因素影响碳储量空间分异,与 Li Xiang 等<sup>[25]</sup>关于地形和植被对碳储量影响的研究结果一致。社会经济因素(如人口密度、GDP)的解释力逐年增强,反映出人类活动对生态系统碳过程的影响逐渐凸显。交互因子分析进一步表明,多因素协同作用对碳储量格局的影响强于单因子,例如年降雨量与人口密度的交互作用显著增强了对碳储量分布的影响,揭示了自然—人文因素耦合驱动的复杂机制。

本研究结果可为鄂西山地生态屏障保护区、江汉平原耕地保护红线划定提供科学依据,如将神农架-武当山片区列为优先碳汇保护区,实施“生态留白”政策;进一步推广“耕地生态退耕—湿地恢复—林地提质”组合措施,如在武汉城市圈周边实施“城市绿心”计划,通过建设用地存量优化释放生态空间;深化生态产品价值实现,建立生态补偿机制;将碳汇与生态保护目标纳入国土空间规划。此外,本研究仍存在局限性,如碳密度参数精度不足、生境质量评估权重主观性较强、碳价估算受不确定因素影响等,后续需进一步探索碳—生境协同机制及碳中和路径,纳入更高时间分辨率数据,深化中长期演变机制分析,为生态建设提供更科学的支撑。

## 5 结论

本研究基于多模型耦合与地理探测器分析,揭示了湖北省陆地生态系统碳储量与生境质量的时空

演变规律及驱动机制。

(1) 湖北省土地利用变化对碳储量与生境质量的影响存在显著阶段性差异。前期,城市化驱动的建设用地扩张导致碳储量下降、生境质量退化,2010—2020年快速城市化驱动耕地大规模转为建设用地,碳储量减少7.47 Tg。2020年后,“长江大保护”等政策使建设用地增速降至2.28%,林地、水域通过生态修复面积回升,有效遏制生态用地流失,推动碳储量增加和生境局部优化。同时,湖北省生境质量呈现“西高东低”的特征,鄂西山地生境质量高,而中部平原及城市带生境退化明显。

(2) 湖北省碳储量与生境质量之间存在复杂的协同关系。经济发展情景下,生态用地向建设用地转移,造成碳汇损失与生境破坏,引发生态系统服务功能双重退化。综合发展情景通过用地管控和生态修复,可实现“增汇”与“提质”双赢。自然发展情景下,缺乏政策干预将导致生态系统逐步退化,碳价值增速趋缓。

(3) 自然因子影响碳储量与生境质量的空间分异。坡度、高程、归一化植被指数的影响程度最强,2010—2023年坡度 $q$ 值始终高于0.86。社会经济因素(如人口密度、GDP)的影响逐年增强,因子交互作用呈现双因子增强或非线性增强的特征。

## 参考文献 (References)

- [1] Zhu Congmou. Evolution of territorial spatial pattern and associated eco-environmental effects from the perspective of major functional zones: A case study of Zhejiang Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (11): stxb202202240428.
- [2] Zhou Guangjin, Gao Jixi, Zhang Riqi, et al. A new perspective for enhancing social and ecological systems coordination in ecological restoration [J]. *Ecological Processes*, 2025, 14(1):20.
- [3] Hou Yongli, Hu Nanxiang, Teng Chao, et al. Monitoring and evaluation of ecological restoration effectiveness: A case study of the Liaohe River estuary wetland [J]. *Sustainability*, 2025, 17(7):2973.
- [4] Mukhopadhyay A, Hati J P, Acharyya R, et al. Global trends in using the InVEST model suite and related research: A systematic review [J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2025, 25(2):389-405.
- [5] Pinto R, Patrício J, Baeta A, et al. Review and evaluation of estuarine biotic indices to assess benthic condition [J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(1):1-25.
- [6] 王子昊,王冰,张宇飞,等.基于PLUS-InVEST模型的呼和浩特市多情景土地利用变化动态模拟及碳储量评估[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(2):292-304.
- [7] 张雄,吴昱佳,谭秋芳.区域土地用途转换碳效应及碳汇补偿机制研究:以湖北省为例[J]. *国土资源科技管理*, 2025, 42(1):64-75.
- [8] 王旭,马伯文,李丹,等.基于FLUS模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1):230-242.
- [9] Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Lai Li, et al. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China [J]. *Environmental Science & Policy*, 2013, 25:50-61.
- [10] 朱耀军,赵峰,郭菊兰,等.湛江高桥红树林湿地有机碳分布及埋藏特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(23):7841-7849.
- [11] 柯新利,唐兰萍.城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响:以湖北省为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(2):672-683.
- [12] Xiang Shujiang, Wang Ying, Deng Hua, et al. Response and multi-scenario prediction of carbon storage to land use/cover change in the main urban area of Chongqing, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142:109205.
- [13] 胡丰,张艳,郭宇,等.基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(4):1125-1136.
- Wang Zihao, Wang Bing, Zhang Yufei, et al. Dynamic simulation of multi-scenario land use change and carbon storage assessment in Hohhot City based on PLUS-InVEST model [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2):292-304.
- Zhang Xiong, Wu Yujia, Tan Qiufang. On carbon effect of regional land use conversion and carbon sink compensation mechanism: A case study of Hubei Province [J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2025, 42(1):64-75.
- Wang Xu, Ma Bowen, Li Dan, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei Province based on FLUS model [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1):230-242.
- Ke Xinli, Tang Lanping. Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2):672-683.
- Hu Feng, Zhang Yan, Guo Yu, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the

- Weihe River basin based on the PLUS and InVEST models and predictions [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(4):1125-1136.
- [14] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J]. *地理研究*, 2017, 36(3):471-484.
- Chen Xin, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity [J]. *Geographical Research*, 2017, 36(3):471-484.
- [15] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. *地理研究*, 2019, 38(9):2173-2187.
- Chen Wanxu, Li Jiangfeng, Zeng Jie, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China [J]. *Geographical Research*, 2019, 38(9):2173-2187.
- [16] Yang Qiangqiang, Zhang Pian, Qiu Xiacong, et al. Spatial-temporal variations and trade-offs of ecosystem services in Anhui Province, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(1):855.
- [17] 包玉斌, 刘康, 李婷, 等. 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响: 以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J]. *干旱区研究*, 2015, 32(3):622-629.
- Bao Yubin, Liu Kang, Li Ting, et al. Effects of land use change on habitat based on in VEST model: Taking Yellow River wetland nature reserve in Shaanxi Province as an example [J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32(3):622-629.
- [18] 钟莉娜, 王军. 基于 InVEST 模型评估土地整治对生境质量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1):250-255.
- Zhong Lina, Wang Jun. Evaluation on effect of land consolidation on habitat quality based on InVEST model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1):250-255.
- [19] 严莉, 曹广超, 康利刚, 等. 基于 InVEST 模型的共和县生境质量时空变化及驱动因素[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(2):314-325.
- Yan Li, Cao Guangchao, Kang Ligang, et al. Analysis of spatial and temporal changes in habitat quality and driving factors in Gonghe County using the InVEST model [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(2):314-325.
- [20] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1):116-134.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [21] 雷馨, 海新权. 耦合 PLUS-InVEST 模型的兰州市土地利用变化及碳储量经济价值估算[J]. *地理科学*, 2025, 45(2):339-348.
- Lei Xin, Hai Xinquan. Assessing economic value of carbon storage and land use changes based on the coupled PLUS-InVEST model in Lanzhou City [J]. *Geographical Science*, 2025, 45(2):339-348.
- [22] Xue Hua, Shi Zhenqin, Huo Jingeng, et al. Spatial difference of carbon budget and carbon balance zoning based on land use change: A case study of Henan Province, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(50):109145-109161.
- [23] Baker S, Eckerberg K. Ecological restoration success: A policy analysis understanding [J]. *Restoration Ecology*, 2016, 24(3):284-290.
- [24] Wang Baorong, Liu Dong, Yang Jiajia, et al. Effects of forest floor characteristics on soil labile carbon as varied by topography and vegetation type in the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 2021, 196:104825.
- [25] Li Xiang, Liu Zhaoshun, Li Shujie, et al. Multi-scenario simulation analysis of land use impacts on habitat quality in Tianjin based on the PLUS model coupled with the InVEST model [J]. *Sustainability*, 2022, 14(11):6923.