

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.018

论文标题： 湖南省森林景观格局对碳储量的非线性影响及其驱动因素分析

作　　者： 冯益星，戴美琪，陈媛媛，等

收稿日期： 2025-08-03

引文格式： 冯益星,戴美琪,陈媛媛,等.湖南省森林景观格局对碳储量的非线性影响及其驱动因素分析[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):184-194.

Feng Y X, Dai M Q, Chen Y Y, et al. Nonlinear effects of forest landscape patterns on carbon storage and their driving factors in Hunan Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):184-194.

相关论文推荐

Recommended articles

辽东山区蒙古栎林不同发育阶段碳储量变化特征及其影响因素

Characteristics of carbon storage variations of *Quercus mongolica* forests at different development stages in the east of Liaoning mountainous area and their influencing factors

基于地理加权随机森林的黑龙江省森林碳储量遥感估测

Geographically weighted random forest approach to predict forest carbon storage by remote sensing in Heilongjiang

长沙市主要优势树种森林碳储量遥感反演

Remote sensing inversion of forest carbon stocks dominated by major dominant tree species in Changsha

基于海拔梯度的华北落叶松林地上碳储量模型

Aboveground carbon storage models for *Larix principis-rupprechtii* forests based on elevational gradients

基于多尺度地理加权回归模型的辽宁省森林碳储量估算

Estimation of forest carbon stocks in Liaoning Province based on a multi-scale geographically weighted regression model

基于分段模型的中条山国有林管理局油松林碳储量估计

Estimation of carbon storage in *Pinus tabulaeformis* forests of Zhongtiaoshan state-owned forest administration based on segmented model

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.018 http: //qks.csuft.edu.cn

湖南省森林景观格局对碳储量的非线性影响及其驱动因素分析

冯益星[1]，戴美琪[1]，陈媛媛[2]，罗 芬[1]

（1. 中南林业科技大学 国家公园与旅游学院，湖南 长沙 410004；
2. 东北林业大学 园林学院，黑龙江 哈尔滨 150083）

摘 要：【目的】探讨并评估湖南省森林景观格局与碳储量的非线性响应关系和驱动机制，优化森林管理和提升区域碳汇功能。【方法】基于湖南省 2000—2020 年土地利用数据，结合 Fragstats 软件与移动窗口法评估区域森林景观格局，借助 InVEST 模型分析碳储量的时空变化特征，采用随机森林机器学习方法明确森林景观格局对区域碳储量的非线性影响，运用 XGBoost-SHAP 模型分析自然与社会经济要素对碳储量的驱动强度。【结果】1）2000—2020 年，湖南省森林景观斑块密度由 1.2 升至 1.4，散布与并列指数由 55.7 升至 59.5，表明森林景观破碎化程度有所增强，不同景观类型之间的空间交错更加明显。2）湖南省碳储量从 20.97 亿 t 下降至 20.86 亿 t，同时碳储量空间分布极不均衡，主要集中在湘南、湘西，长株潭城市群的总碳储量持续下降。3）森林景观格局中，Shannon’s 多样性指数、斑块密度和蔓延度与碳总量、地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量均呈正相关。4）GDP、温度和人口密度是驱动单位碳储量变化的主要因子，其中 GDP 的正向驱动作用最为显著，SHAP 值为 0.61。【结论】通过优化森林景观结构、加大经济投入，实现区域碳储存功能的可持续提升，为探究森林景观格局演变与碳储量的动态关系以及开展森林管理实践提供了科学依据。

关键词：湖南省；森林景观格局；碳储量；机器学习；驱动因素

中图分类号：S771.8 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)08-0184-11

Nonlinear effects of forest landscape patterns on carbon storage and their driving factors in Hunan Province

Feng Yixing[1], Dai Meiqi[1], Chen Yuanyuan[2], Luo Fen[1]

(1. School of National Park and Tourism, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China;
2. College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150083, Heilongjiang, China)

Abstract:【Objective】To explore and evaluate the nonlinear response relationship and driving mechanisms between forest landscape patterns and carbon storage in Hunan Province, and to optimize forest management and enhance regional carbon sequestration capacity.【Method】Based on land use data from 2000 to 2020 in Hunan Province, forest landscape patterns were assessed using the Fragstats and moving window method. The Invest model was used to evaluate the spatiotemporal variation characteristics of carbon storage. On this basis, the random forest machine learning method was applied to clarify the nonlinear impact of forest landscape patterns on regional carbon storage. Finally, the XGBoost-SHAP model was employed to analyze the driving intensity of natural and socio-economic factors on carbon storage.【Result】1) From 2000 to 2020, forest patch density in Hunan Province increased from 1.2 to 1.4, while the interspersion and juxtaposition index increased from 55.7 to 59.5. This indicates intensified forest landscape fragmentation and more pronounced spatial interspersion among different landscape types; 2) The total carbon storage in Hunan Province decreased from 2.097 billion tons to 2.086 billion tonnes, with the spatial distribution of carbon storage being extremely uneven, concentrated mainly in the southern and western regions of Hunan. The total carbon storage in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration continued to decline; 3) Shannon’s diversity index, patch density, and contagion index positive correlations with total carbon, aboveground, and soil carbon storage; 4) GDP, temperature, and population density are the main factors driving the changes in unit carbon storage, with GDP

收稿日期（Received）：2025-08-03 **修订日期**（Revised）：2025-10-20
基金项目：湖南省林业科技创新资金项目（XLKY202219）；自然科学结转科研项目（19801/3176）。
第一作者：冯益星（fengyixing2020@163.com），硕士研究生。 **通信作者：**戴美琪（dmq1966@163.com），教授，博士。
引文格式：冯益星 , 戴美琪 , 陈媛媛 , 等 . 湖南省森林景观格局对碳储量的非线性影响及其驱动因素分析 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2026,46(8):184-194.
Feng Y X, Dai M Q, Chen Y Y, et al. Nonlinear effects of forest landscape patterns on carbon storage and their driving factors in Hunan Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):184-194.

having the most significant positive driving effect (SHAP = 0.61).【Conclusion】This study emphasizes that optimizing forest landscape structure and increasing economic investment can sustainably enhance regional carbon storage capacity. The findings provide a scientific basis for understanding the dynamic relationship between forest landscape pattern evolution and carbon storage, as well as for forest management practices.

Keywords: Hunan Province; forest landscape pattern; carbon storage; machine learning; driving factors

在全球变暖的背景下，森林生态系统通过发挥固碳功能，成为应对气候风险的重要天然解决方案 [1]。联合国公布的数据显示，森林储存了全球陆地生态系统碳库中 77% 的碳 [2]。然而，现有研究较少关注森林内部景观格局与碳库之间的非线性响应关系及其背后的驱动机制。在气候和地形双重自然因素的驱动下，森林景观格局如何影响森林固碳能力的长期演变，这一问题仍有待深入探究。

当前碳汇研究已成为揭示生态系统碳循环功能的重要方向。早期研究主要通过实地采样 [3] 进行生物量估算，从而建立森林生态系统的碳密度模型 [4]。近年来，学者逐渐将研究目光拓展至土壤、凋落物等多类型碳库的碳汇能力 [5-6]，更加全面地解析了生态系统碳汇的来源。同时，在更大的区域尺度上，当前研究主要借助遥感反演、模型模拟 [7] 等技术，实现对碳储量时空分布的精准刻画，为区域乃至全球碳平衡的相关研究提供关键数据支撑 [8-9]。在模型应用方面，生态过程模拟模型是当前估算碳储量的主要途径，现有碳汇估算模型大多是基于植被生物量与碳储量关系构建的经验公式。这类研究通过建立树木胸径、树高与生物量的回归方程估算碳储量。然而，这类模型仅适用于小尺度的碳储量估测，很少应用于区域尺度研究。近些年出现的 CASA[10]、ITREE[11]、CITYGREEN 等碳汇估算模型，通过综合考虑生理过程与气候条件实现碳储量估算，但这些模型大多由国外研发，对参数进行本地化校准极为复杂。此外，上述模型主要专注于地上植被的碳储量估算，并未对土壤碳库、凋落物碳周转等进行充分刻画，对“地下碳过程”的模拟仍存在明显不足，而 InVEST 模型为解决这一局限提供了可行方案 [12]。

作为陆地生态系统碳汇的主力军，森林斑块的面积、形状复杂度、连通度等景观属性，会直接影响其碳汇能力 [13]。早期研究多采用简单的相关性分析方法，探究森林面积等指标与碳储量的线性关系，当前学界已开始关注不同景观要素之间的碳流动问题 [14]。已有研究提出，区域尺度的生态系统斑块镶嵌格局能够保障系统碳平衡 [15]，这意味着在森林生态系统中，人为干扰引发的土地利用变化，会进一步导致森林景观格局改变，最终驱动碳存量发生变化 [16]。然而，现有研究仍存在不足：较少对森林景观格局和碳储量开展长时间序列监测，因而无法捕捉二者之间的非线性关系。目前针对区域尺度森林景观格局与碳储量动态变化关系的研究仍较少，而湖南省是长江流域森林碳汇的关键区域，同时也是生态保护敏感区，该区域的森林系统在气候变化和人类活动的双重驱动下，亟需明确森林景观格局变化对碳储量及自然 - 社会经济因子的驱动机制。

综上所述，本研究以湖南省为研究区域，基于 InVEST 模型开展碳储量评估，并采用机器学习方法探究其驱动因素。本研究先通过 Fragstats 软件量化了 2000—2020 年研究区内森林景观格局的时空演变特征，并通过 InVEST 模型反演了不同森林类型碳储量的动态变化。在此基础上，通过随机森林模型揭示森林景观格局与碳储量之间的非线性响应关系，并采用 XGBoost-SHAP 模型明确自然和社会经济因子对森林碳储量的驱动作用。本研究为提升湖南省森林碳汇能力以及优化区域森林景观格局提供了理论支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

湖南省地处长江中游，地理位置为 108°47′ ～ 114°15′E，24°38′ ～ 30°08′N，总面积为 21.18 万 km^2，地形三面环山。研究区位于亚热带季风气候典型区，年平均温度 16 ～ 18 ℃，年降水量 1 200 ～ 1 700 mm。森林生态系统组分丰富多样，森林覆盖率长期稳定在 59% 以上，是我国南方地区重要的碳库。近年来随着长江流域经济的不断发展，人类活动加剧，土地利用发生转型，导致森林破碎化 [14]，区域森林的碳汇过程也遭到严重影响。

1.2　数据来源

湖南省行政区划（1∶100 万）来源于标准地

图在线服务系统（http://bzdt.chmnr.gov.cn）；土壤类型及概况来源于世界土壤数据库（http://www.fao.org）；中国多时期土地利用遥感监测数据集（30 m×30 m）、归一化植被指数、GDP、人口密度以及夜间灯光等数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn），其中我国多时期土地利用遥感监测数据集包括1980—2020 年的 11 期数据；温度、降水量和高程数据均来源于国家青藏高原科学数据中心（https://www.tpdc.ac.cn）。

1.3 景观格局指数

本研究在已有研究的基础上[17]，从结构特征、空间配置以及组成多样性 3 个方面选取了 17 个景观格局指数。具体为：1）结构特征：斑块数量（NP）、斑块密度（PD）、平均斑块面积（AREA_MN）、最大斑块占比（LPI）、景观形状指数（LSI）、平均形状指数（SHAPE_MN）及平均分形维数（FRAC_MN）；2）空间配置：蔓延度（CONTAG）、相似邻接百分比（PLADJ）、散布与并列指数（IJI）、聚集指数（AI）、斑块内聚力（COHESION）、平均连续性（CONTIG_MN）、分割指数（DIVISION）及分离度（SPLIT）；3）组成多样性：Shannon’s 多样性指数（SHDI）和 Shannon’s 均匀度指数（SHEI）[18]。

此外，为进一步探究景观格局指数对森林碳储量的影响，本研究借助移动窗口法，得到研究区 1 km×1 km 网格景观格局指数的空间分布[19]。进一步利用方差膨胀因子 VIF 剔除存在共线性的指数，最终筛选得到最具代表性的景观格局指数为 PD、CONTAG、SHDI，分别代表景观结构特征、空间配置以及组成多样性 3 个维度。

1.4 碳储量估算

InVEST 模型主要根据各类型土地利用面积以及对应的碳密度参数对碳储量进行估算，碳储量计算公式[20]为：

$$C = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{dead}} + C_{\text{soil}}。\quad (1)$$

式中：C 代表碳储量；C_{above} 代表地上生物碳储量；C_{below} 代表地下生物碳储量；C_{dead} 代表死亡有机质碳储量；C_{soil} 代表土壤有机质碳储量。

参考已有研究[21-23]，本研究将森林的地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度和死亡碳密度分别设为 55.70、167.43、143.30 和 1.90 t/hm^2。

1.5 统计分析

为揭示景观格局指数与碳储量之间的非线性关系，本研究将 1 km×1 km 网格内的碳储量定义为单位碳储量，探究小尺度范围内单位碳储量对景观格局的响应变化。本研究采用随机森林方法探究边际效应，以单位碳储量为因变量，选取 NP、CONTAG、SHDI 等景观格局指数作为自变量，构建随机森林回归模型；通过交叉验证优化决策树数量与最大深度，进一步利用随机森林模型量化关键景观格局指数对碳储量的边际效应，识别两者间的非线性响应关系。此外，本研究采用 XGBoost-SHAP 模型解析自然与社会经济要素对碳储量的驱动作用。XGBoost 模型凭借优异的预测性能捕捉各要素与碳储量之间的复杂关系，SHAP 值则基于博弈论提供一致可靠的解释结果，既能够量化各驱动因子的全局重要性，也能够揭示不同因子对碳储量产生的非线性作用模式。

2 结果与分析

2.1 湖南省森林与景观格局演变趋势

2.1.1 森林转移概况

2000—2020 年，研究区森林用地呈现较为复杂的演变趋势，不仅有林地、灌木林、疏林地和其他林地之间的相互转移，还存在森林用地与非森林用地之间的相互转化（图 1 ～ 2）。森林的空间格局呈现边缘波动、局部恢复的趋势，表明研究区森林的形成与消失共存，景观格局由集聚向分散变化，具体表现为边缘区林地变化频繁，但是核心区相对稳定。研究区有林地变化显著，向其他林地类型转移 1 379.7 km^2，向疏林地转移 763.0 km^2，向灌木林转移 265.6 km^2；有林地同时还向非林地类型转移，具体包括转为水田 652.0 km^2，转为旱地 349.6 km^2，转为工交建设用地 393.6 km^2。研究结果表明，农业开发与城镇化发展对森林资源造成了持续的负面影响。但是非森林用地也存在向森林用地转入的情况，其中旱地转为有林地的面积达 851.6 km^2，水田转为有林地的面积为 625.0 km^2。

2.1.2 森林景观格局

2000—2020 年，研究区森林景观格局整体表现为斑块数量增加、平均斑块面积减小、边界复杂度增强以及聚集程度略有下降的变化特征。从表 1 可以看出，NP 指数从 249 696 升至 295 902，PD 指数从 1.2 升至 1.4，表明森林斑块数量和斑

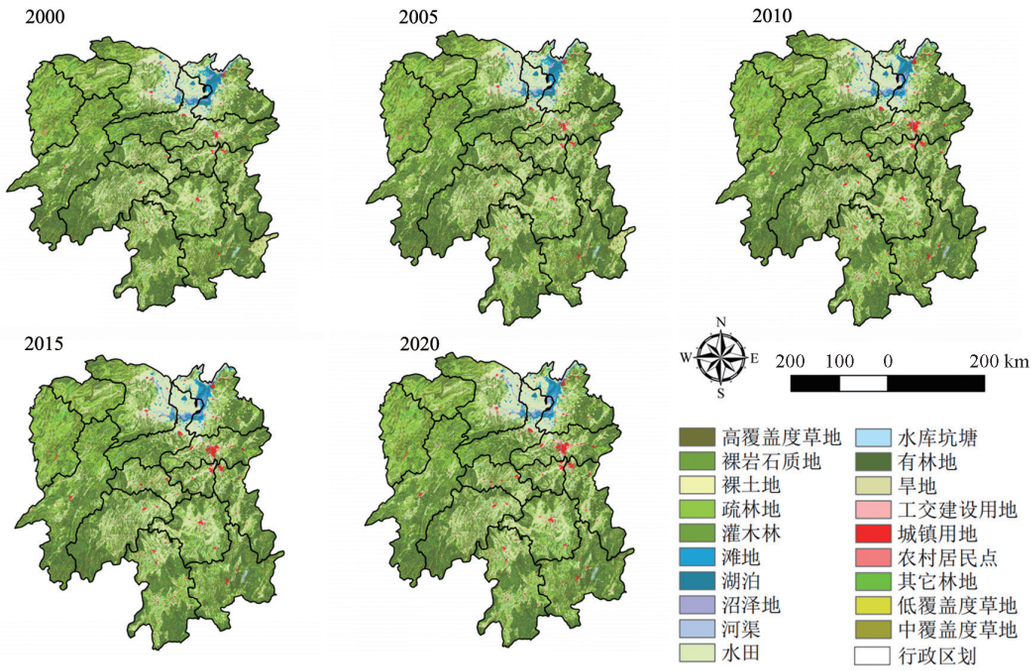
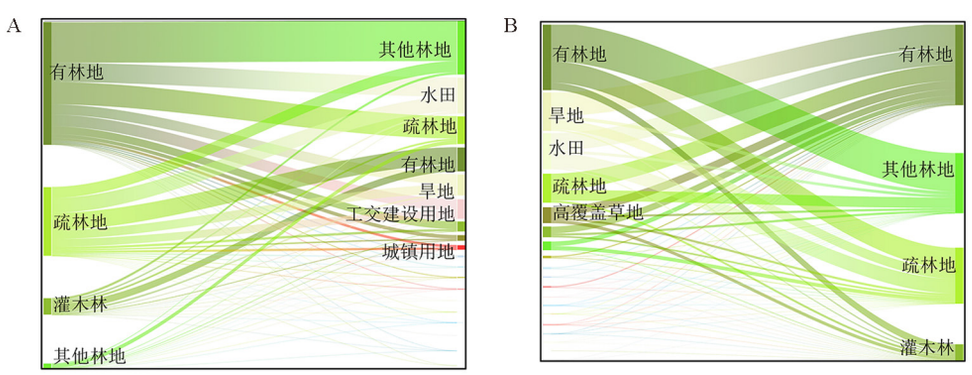


图 1　2000—2020 年湖南省土地利用格局演变

Fig. 1　Evolution of land use patterns in Hunan Province from 2000 to 2020



A、B 分别表示森林转化为其他土地利用类型和其他土地利用类型转化为森林。

A and B represent the conversion of forest to other land-use types and the conversion of other land-use types to forest, respectively.

图 2　2000—2020 年森林转移情况

Fig. 2　Forest transitions from 2000 to 2020

块密度均有所增加；AREA_MN 指数从 86.8 下降至 73.2，说明平均斑块面积减小，森林景观破碎化程度有所增强。与此同时，LSI 指数从 480.2 升至 514.8，表明森林斑块边界趋于复杂化；LPI 指数从 5.0 升至 6.2，说明研究区仍保留一定规模的优势森林斑块。在空间配置方面，DIVISION 指数始终稳定在 0.99 的高值，CONTAG 指数从 64.7 下降至 62.9，PLADJ 指数和 AI 指数均从 93.8 下降至 93.4，表明森林景观的聚集程度和相邻性略有降低；而 IJI 指数从 55.7 升至 59.5，说明不同景观类型间的交错程度有所增强。景观多样性方面，SHDI 指数稳定在 1.8，SHEI 指数稳定在 0.6，表明研究区景观多样性和均匀度整体变化较小。总体来看，研究区森林景观在2000—2020年呈现出斑块细碎化、边界复杂化和空间交错增强的演变特征，但景观多样性和均匀度总体保持稳定。

2020 年，研究区有林地、疏林地、灌木林及其他林地在景观格局上表现出显著差异（图 3）。灌木林和疏林地的斑块密度分别为 0.342 和 0.367，显著高于有林地（0.275）；其他林地的斑块密度相对偏高，表现出分散的空间分布特征。疏林地与灌木林的 Shannon’s 多样性指数分别为 1.461 和 1.442，显著高于有林地的 1.246，说明疏林地与灌木林的异质性更强。有林地的蔓延度为 40.02，明显高于其他林地类型，说明有林地的斑块连通性强、空间分布格局集中，具有较好的完整性和生态稳定性；灌木林、疏林地的蔓延度分别为 31.28 和 32.02，显示出高度碎片化、分布离散的格局。

表 1 2000—2020 年景观格局指数
Table 1 Landscape pattern index from 2000 to 2020

序号 No.	景观格局指数 Landscape pattern index	年份 Year				
		2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
1	NP	249 696	253 064	267 312	288 482	295 902
2	PD	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4
3	LPI	5.0	5.0	5.6	6.2	6.2
4	LSI	480.2	490.3	496.4	501.6	514.8
5	AREA_MN	86.8	85.6	81.0	75.1	73.2
6	SHAPE_MN	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
7	FRAC_MN	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
8	CONTIG_MN	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
9	CONTAG	64.7	64.4	63.9	63.3	62.9
10	PLADJ	93.8	93.7	93.6	93.6	93.4
11	IJI	55.7	56.2	57.5	58.9	59.5
12	DIVISION	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
13	COHESION	99.7	99.8	99.8	99.7	99.7
14	SPLIT	186.3	156.9	155.4	165.1	151.7
15	SHDI	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
16	SHEI	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
17	AI	93.8	93.7	93.6	93.6	93.4

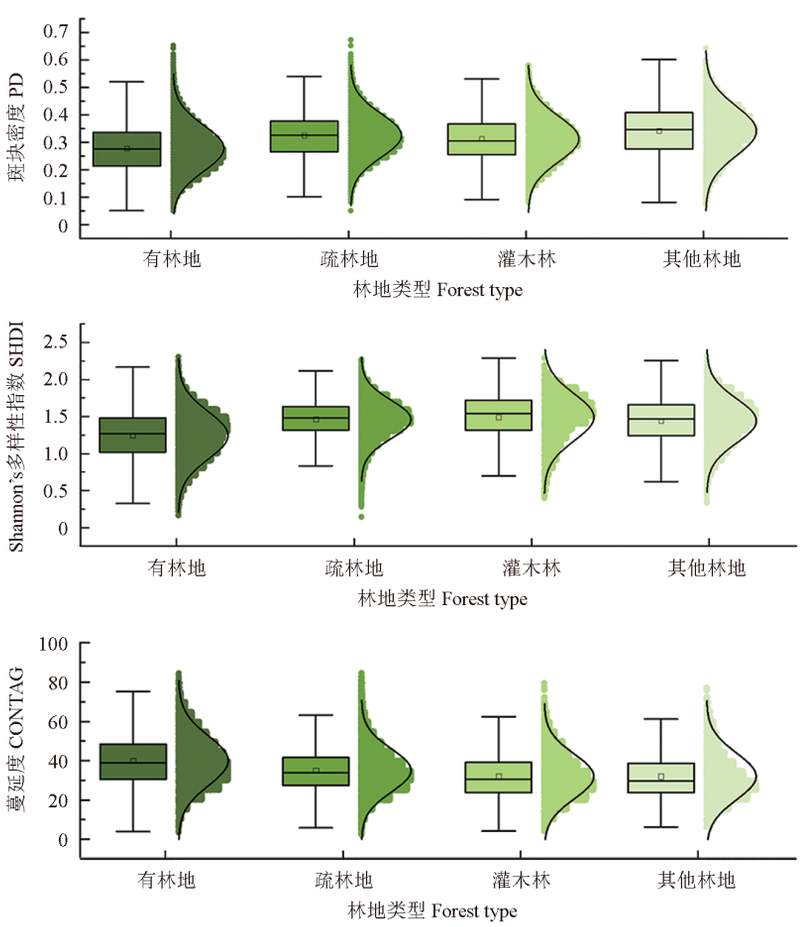


图 3 2020 年森林类型的景观格局指数聚类分析
Fig. 3 Landscape pattern index analysis of forest types in 2020

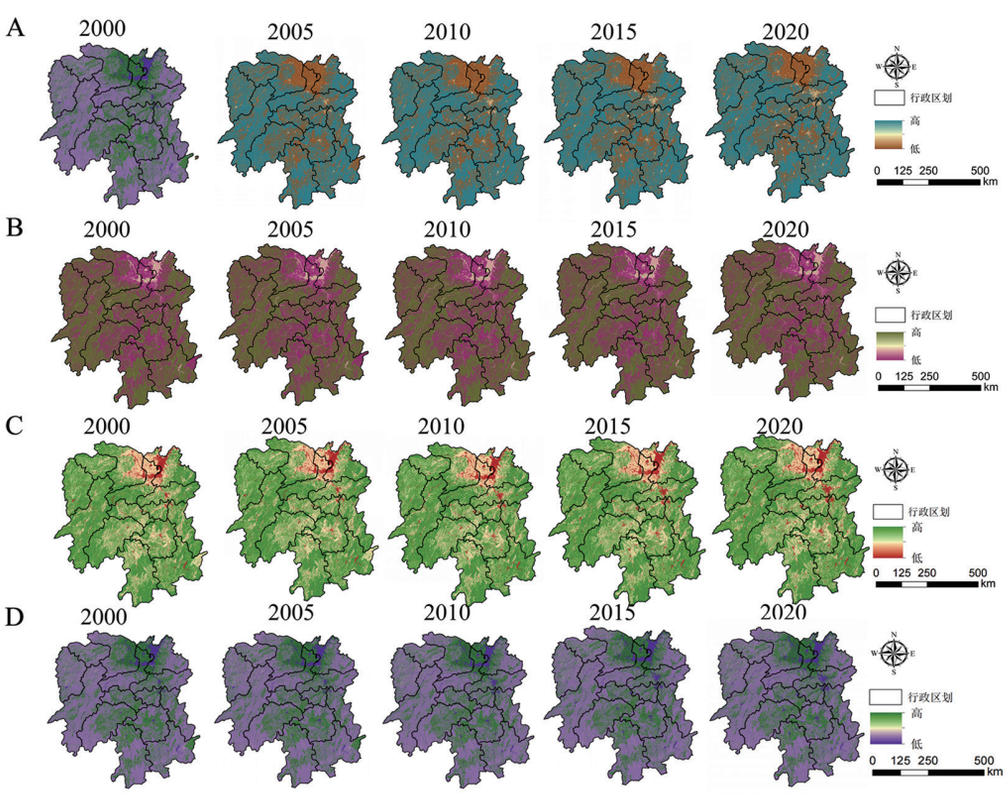
2.2　湖南省森林碳储量空间动态变化

2000—2020 年，研究区碳储量时空演变差异显著（图 4）。总碳储量从 20.97 亿 t 下降至 20.86 亿 t。长沙市碳储量从 1.13 亿 t 降至 1.09 亿 t，湘潭市碳储量从 4.68 亿 t 降至 4.59 亿 t，株洲市碳储量从 12.02 亿 t 降至 11.83 亿 t，表明高强度城镇化压缩了碳汇空间。研究区南部碳储量持续增加，郴州市碳储量从 2.10 亿 t 增至 2.14 亿 t，永州市稳定维持在 2.32 亿 t 以上，张家界市、怀化市、湘西土家族苗族自治州碳储量总体趋于平稳。环洞庭湖区和研究区中部碳储量呈现缓慢减少趋势，其中益阳市、岳阳市、常德市、娄底市和邵阳市碳储量分别下降 0.5%、1.1%、1.3%、0.9% 和 0.5%。结果表明，研究区整体碳储量空间分异显著，全局莫兰指数为 0.32（$P < 0.01$），聚集区域在长株潭城市群。

为了探究碳汇能力的变化规律，本研究以 2000 年与 2020 年湖南省不同森林类型 1 km^2 网格的碳储量数据作为分析碳汇能力的重要依据。研究结果表明，2000—2020 年湖南省森林生态系统的碳结构发生了一定的变化。虽然大部分森林类型的单位面积碳储量略有上升，但受森林面积变动的影响，区域整体碳储量呈现下降趋势。由图 5 ～ 6 可见，不同森林类型的单位面积碳储量在各碳库之间呈现出较为一致的分布规律。土壤单位碳储量主要集中在 13 ～ 14 t/hm^2，是各森林类型单位面积碳储量的主要组成部分；地上单位碳储量主要集中在 4.5 ～ 5.5 t/hm^2，仅次于土壤单位碳储量；地下单位碳储量和死亡单位碳储量整体较低，主要分布在 0 ～ 1.5 t/hm^2。2000—2020 年，研究区各森林类型碳储量分布峰位整体变化较小，表明森林单位面积碳储量结构总体稳定。同时，2020 年部分碳库的分布曲线较 2000 年更为集中，说明单位面积碳储量的空间离散程度有所降低。

2.3　森林景观格局对碳储量的非线性影响

如图 7 所示，景观格局指标 SHDI 与地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量、死亡碳储量、总碳储量均呈显著或极显著正相关。PD 与地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量、死亡碳储量、总碳储量呈显著或极显著正相关。CONTAG 与地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量、总碳储量呈显著或极显著正相关，与死亡碳储量呈负相关。总体来说，这 3 个景观格局指标与各类碳储量之间大多存在显著的正相关关系，仅 CONTAG 与死亡碳储量呈显著负相关。



A、B、C、D 分别表示地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和死亡碳储量。
A, B, C, and D represent above-ground carbon stocks, below-ground carbon stocks, soil carbon stocks, and dead carbon stocks, respectively.

图 4　2000—2020 年湖南省碳储量时空演变
Fig. 4　Spatiotemporal evolution of carbon storage in Hunan Province from 2000 to 2020

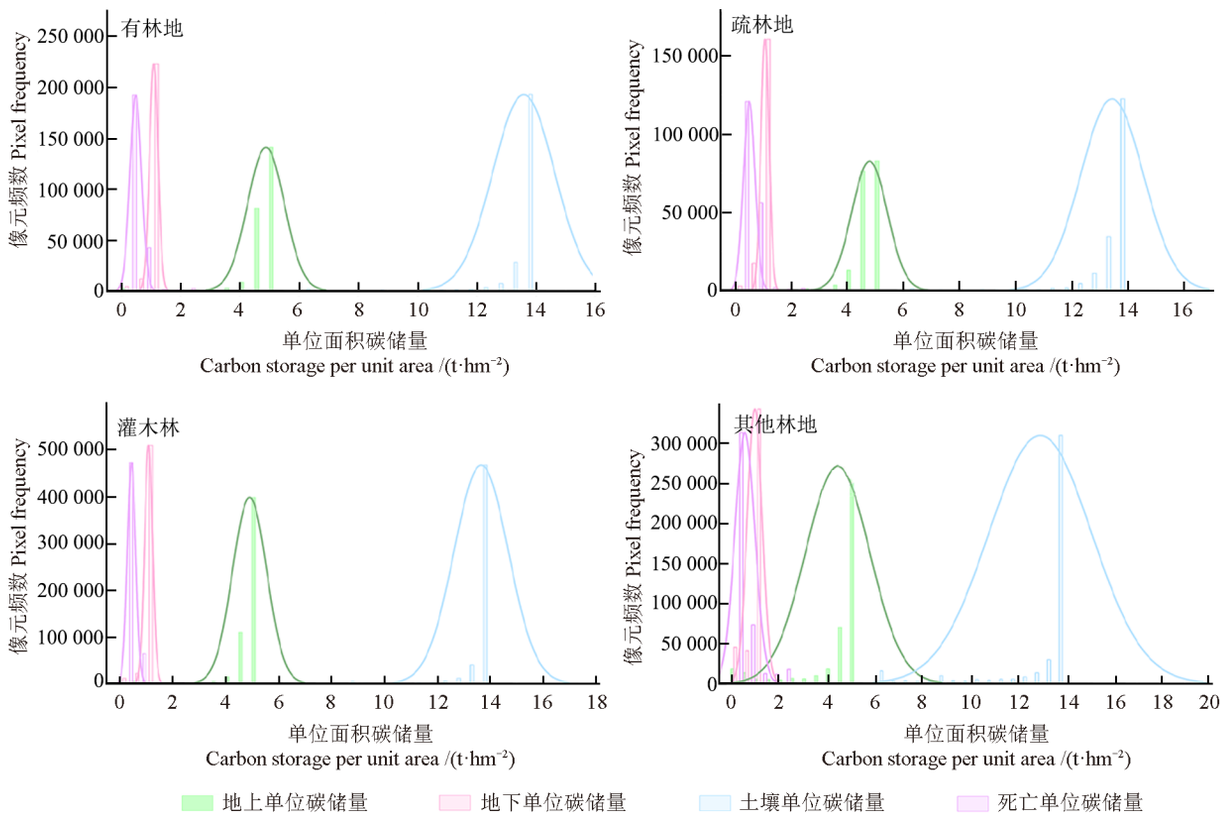


图 5 2000 年不同森林类型的单位面积碳储量均值

Fig. 5 Mean carbon per unit area of different forest types in 2000

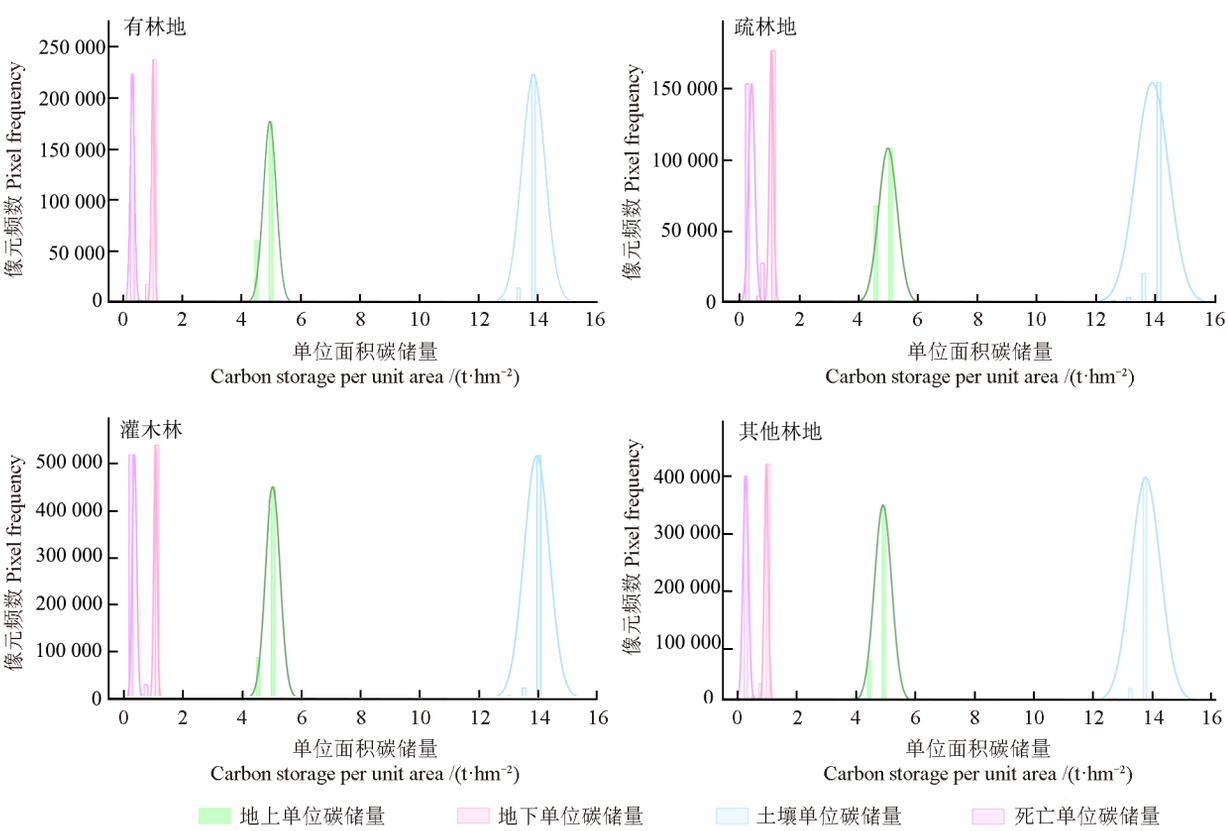
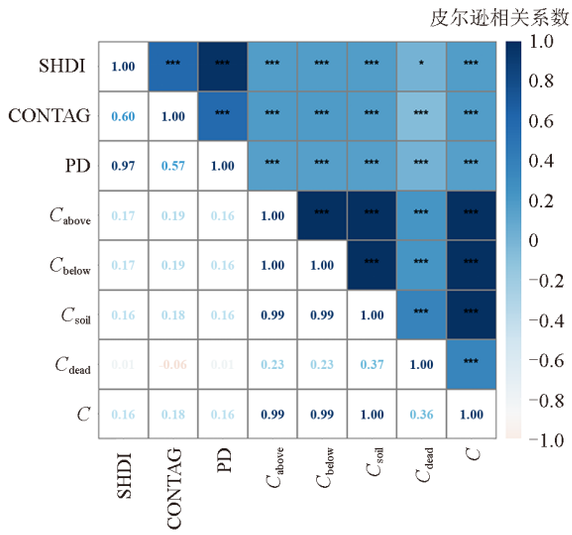


图 6 2020 年不同森林类型的单位面积碳储量均值

Fig. 6 Mean carbon per unit area of different forest types in 2020



*、**、*** 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著。
*, **, and *** indicate significance at the 0.05, 0.01 and 0.001 levels, respectively.

图 7　森林景观格局与不同类型碳储量的相关性分析
Fig. 7　Correlation analysis between forest landscape patterns and different types of carbon stocks

为进一步探究森林景观格局指数对碳储量的影响，本研究借助随机森林模型探究景观格局指数对各类型单位碳储量的边际效应。如图 8 所示，随着 SHDI 值升高，地上、地下以及土壤单位碳储量整体均呈下降趋势，而死亡单位碳储量则有所上升。这说明景观类型越多样、均匀度越高，各类植被单位碳储量反而越低，原因在于景观组成越多样，植被分布就越分散，不利于碳的集中积累。当 CONTAG 指数升高时，地上、地下与土壤单位碳储量均呈上升趋势，仅死亡单位碳储量出现下降。这一现象或许可解释为：当优势景观斑块发生聚集时，生态系统稳定性更强，植被更新速率相对缓慢，枯落物的积累量随之减少；同时，聚集的斑块更有利于生态系统内部的物质循环与能量流动，能够促进植被生长，进而增加碳储量。PD 指数对各碳库单位面积碳储量表现出非线性影响。当 PD 指数较低时，地上、地下和土壤单位碳储量随着 PD 的升高而增加，但在达到一定阈值后逐渐下降，说明适度的景观异质性有利于碳储量的维持，而景观破碎化增强可能削弱森林的碳储存能力。死亡碳储量则呈现不同的响应模式，随着 PD 指数的升高先下降后增加，这可能与破碎化背景下植被死亡、枯落物输入及分解过程变化有关[23]。由于该结果来源于模型响应曲线，相关机制仍需结合实地过程或长期监测数据进一步验证。具体来看，景观破碎化会催生更强的边缘效应，

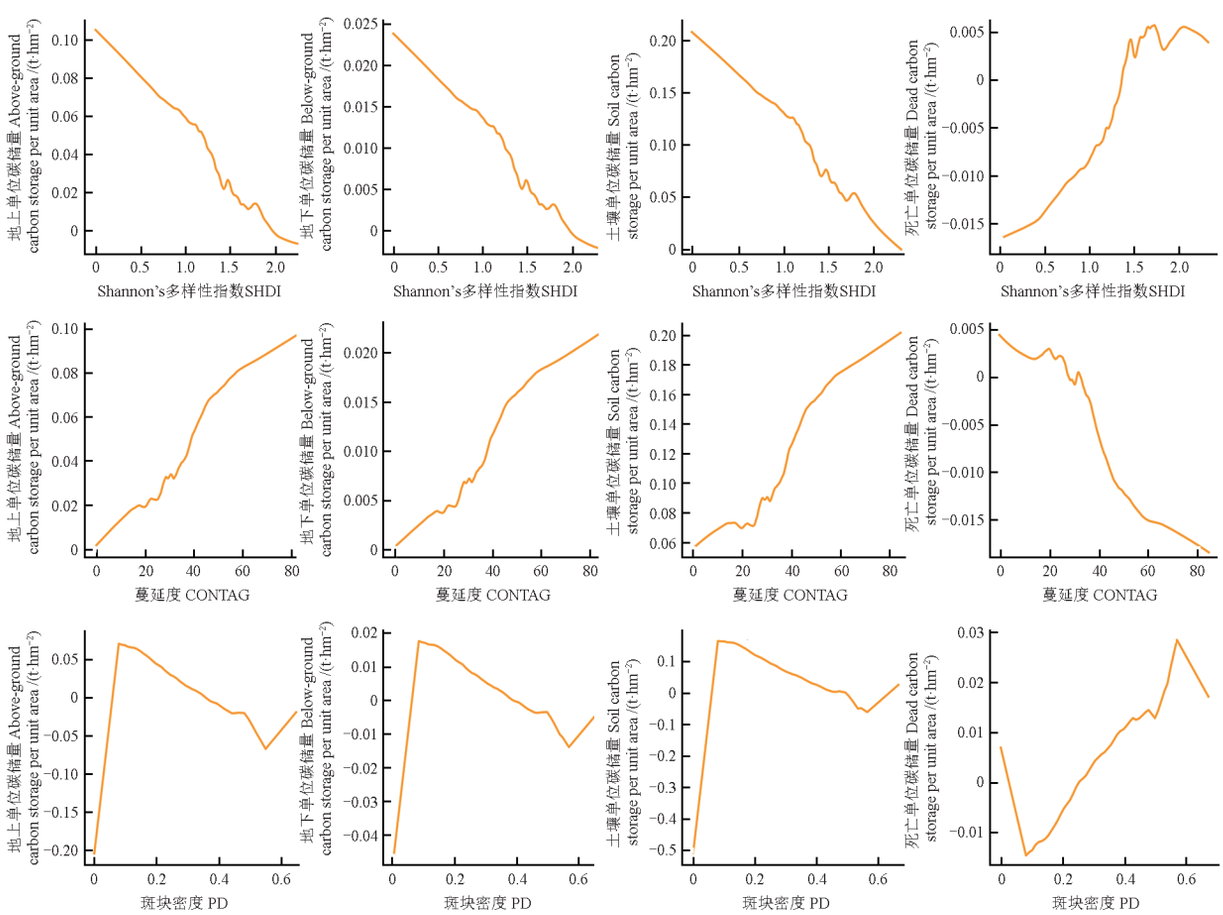


图 8　景观格局对各类型单位碳储量的边际效应分析
Fig. 8　Analysis of the marginal utility of landscape patterns on carbon storage per unit area for different land cover types

加速植被死亡与分解，最终推动死亡碳储量提升；其余类型碳储量虽也有小幅度上升，但变化并不明显，这一结果反映出景观破碎化对不同类型碳储量的影响机制存在显著差异。

2.4 影响森林单位碳储量分布的主要因素

除森林景观格局外，部分自然因素与非自然因素也会对森林单位碳储量产生影响[14]。本研究基于 XGBoost 模型开展 SHAP 值分析，综合评估温度、降水量、高程、GDP、人口密度以及夜间灯光共 6 个自然与社会经济要素对单位碳储量的影响。如图 9 所示，GDP、温度和人口密度是影响单位碳储量的主要因子。GDP 的 SHAP 值表现出显著的正向影响，即 GDP 水平越高的区域，森林单位碳储量越高。整体变化趋势显示，温度升高有助于提升单位碳储量，但在高温区间，单位碳储量的增速有所减缓。高人口密度地区的单位碳储量更高，但人口过于密集的区域单位碳储量的增幅有所减弱，这可能是城市化对区域自然生境产生负面作用导致的。

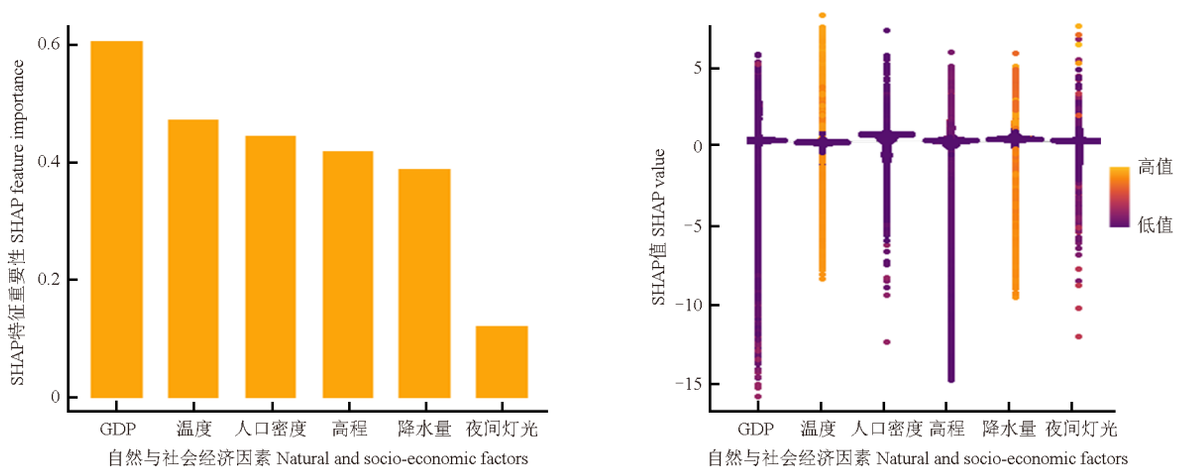


图 9 自然与社会经济因素对单位碳储量空间分布的影响

Fig. 9 Influence of natural and socio-economic factors on the spatial distribution of unit carbon stocks

3 讨 论

本研究结果表明，2000—2020 年湖南省森林景观发生了显著的格局变化，且这些变化对区域碳储量产生了深远影响。具体表现为 PD、NP 不断增加，CONTAG、AI 减小，这表明森林优势斑块的空间聚合性有所降低，破碎度提升导致森林连续性降低，进而致使碳汇功能下降。同时，SHDI 整体变化幅度较小，表明研究区森林景观组成多样性总体较为稳定。从景观格局指数对碳储量的影响来看，PD、SHDI、CONTAG 与总碳储量呈正相关，且主要与地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量呈显著正相关，表明森林景观格局变化对碳储量的影响较大。本研究进一步通过随机森林模型分析了 3 个景观格局指数对碳储量的边际效应。结果表明，当斑块密度 PD 较低时，会提升区域局部碳储量；但当破碎度指数超过阈值后，死亡碳储量的增加速率反而提升。该现象的成因在于景观破碎化会加剧边缘效应，促进死亡植物的分解与积累，进而推动死亡碳储量增加。CONTAG 的提升则会单向促进地上碳储量、地下碳储量以及土壤碳储量的积累，说明连通度更高的林地更有利于森林生态系统碳汇储量的累积，证明提升森林景观连通度对区域碳汇具有积极作用[24-25]。

除景观结构外，自然与社会经济因素同样是影响碳储量的重要因素[26-27]。XGBoost-SHAP 模型的结果表明，GDP、温度、人口密度是影响湖南省碳储量的三大主导因素。GDP 对单位面积碳储量存在正向影响，说明经济发展水平较高的区域，植被恢复、生态修复与绿色基础设施等建设水平更高[28-30]。气温升高总体上会促进单位碳储量增长，但在高气温区间增速会放缓，表明过度炎热的局地气候会造成碳汇量减少。人口密度与单位碳储量呈正相关，但在局地人口密集区域增长趋势趋于平缓，甚至出现单位碳储量降低的情况，表明城市化发展初期，能够通过绿色空间建设带动单位碳储量提升，而城市化过度发展则会导致碳源大于碳汇。总体来看，湖南省森林单位碳储量的变化是人为因素与自然因素共同作用的结果，人为活动增加导致森林景观结构异化，对森林碳储量分布格局的破坏较为明显[31]，但政府出台的各项生态措施对区域碳储量具有维持甚至提升作

用[32-33]。为推进区域建设，一方面应当加强森林连通性保护与大型森林斑块保护，优化森林景观结构，促进森林生态系统的稳定发展；另一方面需要从经济与政策层面统筹城市绿色建设，实现经济社会发展与生态碳汇能力提升的共赢。

4　结　论

本研究基于 2000—2020 年湖南省土地利用数据，在提取森林景观格局指数、解析碳储量时空演变特征的基础上，分别借助随机森林模型和 XGBoost-SHAP 模型，探究森林景观格局演变对碳储量的非线性影响，以及自然和社会经济因子对单位碳储量的驱动作用。本研究发现，湖南省森林景观格局总体呈现破碎化趋势，同时存在局部连通度提升、景观多样性增加的特征。碳储量分布表现为湖南省西南部高、长株潭城市群低的空间分异规律，说明城镇化发展会导致碳储存能力下降，生态保护区域碳储量更高。景观格局指数与碳储量整体呈正相关，连通性良好的森林有助于维持碳汇功能，其中森林景观连通性每提升 10%，碳储量可增加 2.3 t/hm^2。在各类驱动因子中，GDP、温度与人口密度是影响单位碳储量变化的主导因素，其中 GDP 对碳储量变化的贡献度为 0.61，驱动作用较强。因此，研究区未来发展规划应重视优化森林景观格局，强化对大型森林斑块的保护，提升森林连通性，统筹自然资源保护与社会经济发展，共同推动区域碳汇能力实现可持续提升。

参考文献：

[1] 胡原 , 王其 , 曾维忠 . 森林碳汇与生物多样性保护协同 : 理论逻辑与提升路径 [J]. 生态学报 ,2025,45(10):5053-5063.
Hu Y, Wang Q, Zeng W Z. Synergy between forest carbon sink and biodiversity conservation: theoretical logic and improvement paths[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(10):5053-5063.

[2] 刘毅 . 让森林“碳库”储量持续增加 [EB/OL]. 人民日报 , 2022-05-07.https://www.forestry.gov.cn/c/www/wsx/54732.jhtml.
Liu Y. Increasing forest “carbon reservoir” reserves continuously [EB/OL]. People’s Daily,2022-05-07.https://www.forestry.gov.cn/c/www/wsx/ 54732.jhtml.

[3] 唐雪海 , 宋维静 , 汪春霞 , 等 . 基于机器学习的森林地上碳储量遥感估算及时空变化分析 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2025,45(8):167-182.
Tang X H, Song W J, Wang C X, et al. Remote sensing estimation and spatiotemporal variation of forest above-ground carbon storage based on machine learning[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(8):167-182.

[4] 胡懿凯 . 淇澳岛不同恢复类型红树林碳密度和固碳速率比较研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2019:10.
Hu Y K. Comparative studies on carbon density and carbon fixation of mangroves of different recovery types in Qi’ao island[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2019:10.

[5] 夏安全 , 王艳芬 , 郝彦宾 , 等 . 复杂地形草地植被碳储量遥感估算研究进展 [J]. 生态学报 ,2020,40(18):6338-6350.
Xia A Q, Wang Y F, Hao Y B, et al. Research progress on estimation of vegetation carbon storage of grasslands on complex terrain by remote sensing technology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(18):6338-6350.

[6] 陈子豪 , 焦泽彬 , 刘谣 , 等 . 凋落物季节性输入对川西亚高山森林土壤活性有机碳的影响 [J]. 应用与环境生物学报 , 2021,27(3):594-600.
Chen Z H, Jiao Z B, Liu Y, et al. Influences of seasonal litter input on soil active organic carbon in subalpine forests in western Sichuan[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2021,27(3):594-600.

[7] 张艺蓁 , 吴绍安 , 王建 , 等 .2001—2023 年春陵水流域植被碳储量时空变化及碳汇潜力分析 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2025,45(12):119-131,153.
Zhang Y C, Wu S A, Wang J, et al. Analysis of spatial and temporal changes in vegetation carbon stocks and carbon sink potential in Chongling water basin from 2001 to 2023[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(12): 119-131,153.

[8] 帕茹克·吾斯曼江 , 艾东 , 方一舒 , 等 . 基于 InVEST 与 CA-Markov 模型的昆明市碳储量时空演变与预测 [J]. 环境科学 , 2024,45(1):287-299.
Paruke·Wusimanjiang, Ai D, Fang Y S, et al. Spatial and temporal evolution and prediction of carbon storage in Kunming City based on InVEST and CA-Markov model[J]. Environmental Science, 2024,45(1):287-299.

[9] Sun W L, Liu X H. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China[J]. Forest Ecosystems, 2020,7:4.

[10] Zhao J F, Liu D S, Zhu Y J, et al. A review of forest carbon cycle models on spatiotemporal scales[J]. Journal of Cleaner Production,2022,339:130692.

[11] 郭爱青 , 王德彩 , 闫坤 , 等 . 应用 CASA 模型估算河南省主要森林植被碳储量 [J]. 东北林业大学学报 ,2023,51(11):80-85.
Guo A Q, Wang D C, Yan K, et al. CASA model in estimating main forest vegetation carbon in Henan Province[J]. Journal of Northeast Forestry University,2023,51(11):80-85.

[12] 马杰 , 贾宝全 , 张文 , 等 . 北京市六环内城市森林结构总体特征 [J]. 生态学杂志 ,2019,38(8):2318-2325.
Ma J, Jia B Q, Zhang W, et al. The characteristics of urban forest structure within the Sixth Ring Road of Beijing[J]. Chinese Journal of Ecology,2019,38(8):2318-2325.

[13] Tadese S, Soramessa T, Aneseye A B, et al. The impact of land cover change on the carbon stock of moist afromontane forests in the Majang forest biosphere reserve[J]. Carbon Balance and

Management,2023,18:24.

[14] 王剑武 , 季碧勇 , 王铮屹 , 等 . 浙江省丽水市亚热带森林景观格局对森林碳密度的影响 [J]. 浙江农林大学学报 ,2024,41(1):30-40.
Wang J W, Ji B Y, Wang Z Y, et al. Impact of subtropical forest landscape pattern on forest carbon density in Lishui City of Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2024,41(1):30-40.

[15] Feng R D, Liu S H, Wang F Y, et al. Quantifying the environmental synergistic effect of cooling-air purification-carbon sequestration from urban forest in China[J]. Journal of Cleaner Production,2024,448:141514.

[16] 谢立军 , 白中科 , 杨博宇 , 等 . 碳中和背景下国内外陆地生态系统碳汇评估方法研究进展 [J]. 地学前缘 ,2023,30(2):447-462.
Xie L J, Bai Z K, Yang B Y, et al. Carbon sequestration assessment methods at home and abroad for terrestrial ecosystems: research progress in achieving carbon neutrality[J]. Earth Science Frontiers, 2023,30(2):447-462.

[17] 胡凯群 , 林美霞 , 吝涛 , 等 . 快速城镇化过程中的城市蔓延与生态保护冲突空间识别与量化评估 : 以长三角生态绿色一体化发展示范区为例 [J]. 生态学报 ,2022,42(2):462-473.
Hu K Q, Lin M X, Lin T, et al. Spatial identification and quantitative evaluation of conflict space between urban sprawl and ecological protection in the process of rapid urbanization: a case study of the Yangtze River Delta eco-green integrated development demonstration zone[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(2):462-473.

[18] Mcgarigal K, Marks B J. FRAGSTATS V4: spatial pattern analysis program for categorical maps[M]. Amherst: University of Massachusetts,2012:153-168.

[19] Chen M, Ren Z Y, Bi S B. Impact of green space patterns on $PM_{2.5}$ levels: a local climate zone perspective[J]. Journal of Cleaner Production,2024,478:143975.

[20] 张舟 , 刘晶晶 , 张权 , 等 . 基于 PLUS-InVEST-Geodector 模型的苏州市碳储量时空变化及驱动力分析 [J]. 环境科学 ,2025,46(5):2963-2975.
Zhang Z, Liu J J, Zhang Q, et al. Analysis of spatial-temporal variation and driving forces of carbon storage in Suzhou City based on the PLUS-InVEST-geodetector model[J]. Environmental Science,2025,46(5):2963-2975.

[21] 刘曦乔 , 梁萌杰 , 陈龙池 , 等 . 湖南省森林生态系统碳储量、碳密度及其空间分布 [J]. 生态学杂志 ,2017,36(9):2385-2393.
Liu X Q, Liang M J, Chen L C, et al. Carbon storage, carbon density and spatial distribution of forest ecosystems in Hunan Province[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(9):2385-2393.

[22] 黄计 , 黄琦 , 邓森 . 基于 PLUS-InVEST 模型的湖南省土地利用模拟规划与碳储量评估 [J]. 城市勘测 ,2024(6):69-73.
Huang J, Huang Q, Deng S. Assessment and planning of land use change and carbon storage in Hunan Province based on the PLUS-InVEST model[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying,2024(6):69-73.

[23] 王安 . 基于 InVEST 模型的长株潭城市群生态系统服务动态变化及其驱动因素研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 , 2024:13.
Wang A. Study on the dynamic changes and driving factors of ecosystem services in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration based on InVEST model[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2024:13.

[24] Hou Y L, Wang L X, Li Z W, et al. Landscape fragmentation and regularity lead to decreased carbon stocks in basins: evidence from century-scale research[J]. Journal of Environmental Management,2024,367:121937.

[25] Guo H Q, Yu Q, Pei Y R, et al. Optimization of landscape spatial structure aiming at achieving carbon neutrality in desert and mining areas[J]. Journal of Cleaner Production,2021,322:129156.

[26] Zhang D H, Jing P Q, Sun P J, et al. The non-significant correlation between landscape ecological risk and ecosystem services in Xi'an metropolitan area, China[J]. Ecological Indicators, 2022,141:109118.

[27] Contosta A R, Lerman S B, Xiao J F, et al. Biogeochemical and socioeconomic drivers of above-and below-ground carbon stocks in urban residential yards of a small city[J]. Landscape and Urban Planning,2020,196:103724.

[28] Luo D, Zhou Z F, Zhang L, et al. Evolution and driver analysis of forest carbon stocks in karst mountainous areas of southwest China in the context of rocky desertification management[J]. Catena,2024,246:108335.

[29] Yin S W, Gong Z W, Gu L, et al. Driving forces of the efficiency of forest carbon sequestration production: spatial panel data from the national forest inventory in China[J]. Journal of Cleaner Production,2022,330:129776.

[30] 张伏中 , 刘灿 , 熊曦 , 等 . 湖南省生态强省建设成效分析及对策研究 [J]. 环境生态学 ,2021,3(6):99-102.
Zhang F Z, Liu C, Xiong X, et al. Effectiveness analysis and countermeasure research of ecological province construction in Hunan Province[J]. Environmental Ecology,2021,3(6):99-102.

[31] 杨君 , 刘畅 , 袁淑君 , 等 . 不同空间尺度耕地利用转型碳排放及其影响因素 —— 以湖南省为例 [J]. 水土保持通报 , 2025,45(1):264-275.
Yang J, Liu C, Yuan S J, et al. Carbon emissions of cultivated land use transformation and influencing factors at different spatial scales: a case study in Hunan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2025,45(1):264-275.

[32] Reinmann A B, Smith I A, Thompson J R, et al. Urbanization and fragmentation mediate temperate forest carbon cycle response to climate[J]. Environmental Research Letters,2020,15:114036.

[33] 黄麟 . 造林气候调节效应及其影响机理研究进展 [J]. 生态学报 ,2021,41(2):469-478.
Huang L. A review on the climatic regulation effects of afforestation and its impact mechanisms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(2):469-478.

[本文编校：戴欧琳]