

引文格式：莫金宵, 雷冬梅, 李杰, 等. 县级自然保护区土地利用景观格局与固碳功能关系分析——以云南省梁王山为例[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(4): 694–703. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202211001](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202211001)

县级自然保护区土地利用景观格局与固碳功能关系分析——以云南省梁王山为例^{*}

莫金宵¹, 雷冬梅^{1**}, 李杰², 高丽萍¹, 冉玉菊¹

(1. 云南财经大学 财政与公共管理学院, 云南省高原山地土地利用重点实验室, 云南昆明 650221;
2. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南昆明 650500)

摘要:【目的】探究土地利用景观格局变化与生态系统碳储存功能的相关性, 为维护小尺度区域生态系统服务功能稳定提供参考。【方法】以云南省梁王山县级自然保护区为研究对象, 运用景观格局指数评价法、InVEST 碳储量评估模型和灰色关联法, 探究梁王山 2000—2020 年土地利用格局与碳储量变化的时空特征及两者的相关性。【结果】(1) 20 年间, 耕地减少量最大, 建设用地、林地和草地的面积略有提升, 类型转移以林地、草地和耕地之间的相互转换为主, 建设用地主要来自林地和草地的转入。(2) 景观格局总体趋于复杂化与不规则化, 破碎化程度增加, 异质性相对减弱。其中, 建设用地和草地的景观破碎度明显增加, 林地斑块的连通性增加, 林地最大斑块指数由 23.00 上升至 23.80。(3) 总碳储量有所增加, 20 年间从 227 055.48 t 上升至 227 840.14 t。碳储量存在明显的空间差异性, 高碳储量区域主要分布在保护区东北部和中部区域。(4) 景观蔓延度指数与总碳储量的关联度最高, 达 0.99。【结论】梁王山自然保护区不同景观格局指数与碳储量的相关性存在差异; 林地作为景观的优势斑块, 其面积是影响保护区总碳储量值的重要因素。

关键词: 土地利用变化; 碳储量; 关联度分析; 时空格局; 梁王山县级自然保护区

中图分类号: X171.4 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2023) 04-0694-10

Analysis on the Relationship between Land Use Landscape Pattern and Carbon Sequestration Function in County-level Nature Reserves: a Case Study of Liangwang Mountain in Yunnan Province

MO Jinxiao¹, LEI Dongmei¹, LI Jie², GAO Liping¹, RAN Yuju¹

(1. Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Land Use, School of Finance and Public Administration, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China;
2. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: [Purpose] To explore the correlation between changes of land use landscape patterns and ecosystem carbon storage functions, providing a reference for maintaining the stability of small-scale regional ecosystem services. [Methods] Taking Liangwang Mountain County-level Nature

收稿日期: 2022-11-02 修回日期: 2023-06-25 网络首发日期: 2023-08-02

*基金项目: 教育部人文社科资助项目 (20XJAZH005); 云南省科技厅基础研究专项 (202001BB050073)。

作者简介: 莫金宵 (1996—), 男, 湖北武汉人, 在读硕士研究生, 主要从事土地生态与可持续利用研究。

E-mail: 897706764@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 雷冬梅 (1979—), 女, 福建三明人, 博士, 副教授, 主要从事土地生态学研究。E-mail: dmlei@ynufe.edu.cn

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/53.1044.S.20230801.1719.001.html>



Reserve in Yunnan Province as research area, the spatial-temporal features changes of land use pattern and carbon storage from 2000 to 2020 and the correlation between them were explored by landscape metrics evaluation method, InVEST carbon stock assessment model and grey relational grade analysis method. [Results] 1) During the 20-year period, the largest decrease area of land use was cultivated land, with a slight increase in construction land, forestland and grassland. Furthermore, type transfer mainly involved the mutual conversion among forestland, grassland, and cultivated land, while construction land mainly came from the transfer of forestland and grassland. 2) The landscape pattern generally became to be more complex and irregular, with increased fragmentation and relatively weaker heterogeneity. The landscape fragmentation in construction land and grassland increased obviously, while the connectivity of forestland patches increased, with the forestland's largest patch index increased from 23.00 to 23.80. 3) The overall carbon storage increased from 227055.48 t to 227840.14 t. There were obvious spatial differences in carbon storage, and the high carbon storage areas were mainly concentrated in the northeast and central regions. 4) The correlation between landscape contagion index and total carbon storage was the highest, and the correlation coefficient reached 0.99. [Conclusion] The correlation between different landscape pattern indices and the ecosystem carbon storage is different in Liangwang Mountain County-level Nature Reserve. As the dominant landscape patch, the area of forestland is an important factor affecting the total carbon storage value of this reserve.

Keywords: land use change; carbon storage; correlation analysis; spatial-temporal pattern; Liangwang Mountain County-level Nature Reserve

随着人类社会工业化与城镇化的持续推进, CO₂等温室气体排放量仍呈现上升态势, 全球气候变暖问题日益严峻^[1]。土地利用/覆被变化 (land use/cover change, LUCC) 作为影响全球气候变化的重要原因之一, 不仅显著改变了陆地生态系统的景观结构^[2], 而且会进一步影响以陆地生态系统为载体的碳储存等生态系统服务功能^[3-4]。2020年, 中国提出“碳中和”发展目标, 碳储量相关研究逐渐成为热点^[5-6]。当前, 中国仍处在工业化与城镇化快速发展阶段, 经济的快速增长势必带来温室气体排放总量增加以及土地利用格局的快速变化。在此背景下, 了解 LUCC 与生态系统碳储存服务功能变化的关系, 对“碳中和”以及生态文明建设目标的实现具有重要现实意义^[7]。

目前, 碳储量估算研究主要集中于如森林^[8-10]、草地^[11-12]和耕地^[13-14]等单一生态系统, 陆地生态系统碳储存功能对土地利用格局变化的响应研究也备受关注^[15-16]。近年来, 随着地理信息技术与生态系统服务评估模型的不断发展, 基于两者耦合的研究方法为探究区域土地利用格局变化与生态系统碳储存服务功能的关系提供了新思

路。其中, InVEST 模型 (integrated valuation of environment service and trade-offs) 因所需数据较少、评估结果表达直观而被国内外学者广泛应用^[14], 如: ISLAM 等^[17]和 AITALI 等^[18]通过遥感影像与 InVEST 模型对碳储量进行监测, 以期实现优化土地利用结构和维护生态系统服务功能的目的; 在国内, 基于 InVEST 模型与 3S 技术的碳储量研究也已经成功应用于省^[19]、市^[20]和流域^[21]等多个区域。总体来看, 已有研究成果积极地推动了土地利用与碳储量估算的相关研究, 但研究区域多以大、中型尺度为主, 小尺度研究相对较少。由于不同尺度的独立观测无法定量表达不同尺度下人类活动与生态系统的相互作用, 因此, 小尺度下区域碳储量以及相关模型的适用性研究有待进一步补充。

自然保护区对于维护区域生态系统稳定有着积极的作用^[22]。县级自然保护区作为典型的小尺度区域, 其土地利用变化与碳储存功能变化具有特殊性。梁王山县级自然保护区肩负着区域水源涵养以及气候调节等多重生态系统服务功能, 但近年来随着人类活动扰动的增加, 保护区内土地

利用格局不断发生变化，势必影响区域生态系统的稳定与生态系统碳储存服务功能。鉴于此，本研究以梁王山县级自然保护区为例，基于高清遥感影像对保护区土地利用时空变化特征进行分析，并运用 InVEST 模型测算碳储量，采用灰色关联度分析法进一步剖析碳储量变化的重要相关因素，以期为保护区土地利用政策制定以及维护小尺度区域生态系统服务功能稳定提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

梁王山县级自然保护区成立于 1998 年，位

于云南省玉溪市澄江市，总面积约 2 358.79 hm²，地处 N24°43'45"~24°48'08"，E102°53'10"~102°58'05"，坐落于滇中小江断裂地带东部边缘，山脉自西北向东南倾斜延伸，是抚仙湖、阳宗海和滇池三大高原湖泊的天然生态屏障（图 1）。地势北高南低，最高海拔 2 791 m，最低海拔 1 956 m，相对高差 835 m。属低纬度高原季风气候区，年平均气温 11.7 °C，年降雨量 1 100~1 400 mm，相对湿度 76%。区内生物多样性丰富，植物种类以华山松为主。由于地理位置的特殊重要性，梁王山保护区未来旅游开发潜力较大。

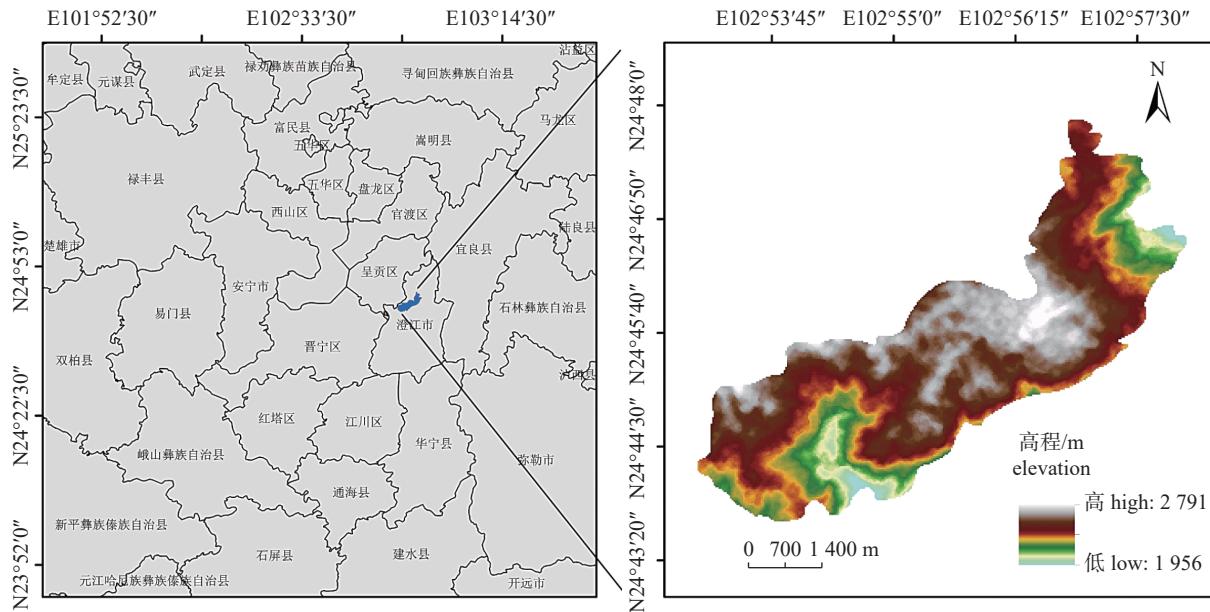


图 1 梁王山自然保护区位置示意图

Fig. 1 Diagram location of Liangwang Mountain Nature Reserve

1.2 数据来源及处理

基于澄江市 2000 年、2010 年、2015 年和 2020 年的高清遥感影像数据（分辨率为 10 m，由 BIGAMAP 软件获取），对研究区域 4 期的遥感影像进行目视解译，获取梁王山自然保护区 4 期土地利用数据。因从高清遥感影像上未发现水域，故依据《土地利用现状分类标准》（G/T 21010—2007）将研究区土地类型分为耕地、林地、草地、未利用地和建设用地 5 大类。为保证相关操作在 ArcGIS 10.2 软件中能顺利完成，分别对 4 期土地利用数据以及其他相关数据进行坐标系统一和格式转换等操作。景观格局指数数据依据上述土地覆盖数据，运用 Fragstats 4.2 软件计算得出。碳密

度值来源于云南省碳密度相关研究以及根据前人研究成果^[23-26]计算得到。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用动态度

土地利用动态度是定量评价土地利用变化的重要指标，包括单一和综合土地利用动态度^[5]，计算公式为：

$$N_c = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times 100\%;$$

$$L_c = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{ij}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \times \frac{1}{T} \times 100\%.$$

式中: N_c 和 L_c 分别为单一和综合土地利用动态度; U_a 和 U_b 分别为某土地利用类型在研究时段内初期和末期的面积; T 为研究时长; i 和 j 为土地利用类型; LU_i 代表研究初期 i 类土地利用类型的面积; ΔLU_{ij} 代表研究时间段内 i 类土地利用类型向 j 类土地利用类型转化的面积。

1.3.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵通过追踪各地类之间的相互转换和数量分布, 从而明晰研究时间段内各土地利用类型之间的流向与结构^[5], 其表达式为

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix}.$$

式中: S_{ij} 为研究初期和末期的土地利用状态; n 为土地利用类型数量; 向量为各土地利用类型的面积。

1.3.3 景观格局分析

景观格局指数可以量化土地利用的结构组成和空间配置等特征。本研究结合研究区景观分布特点并参考前人的研究成果^[27-29], 从景观水平与斑块类别层面选择相关指数。景观层面选取斑块景观形状指数、周长面积分维数、蔓延度指数、斑块数量、斑块密度、香农多样性指数和香农均匀度指数共 7 个指数^[27]; 斑块类别层面选取最大斑块指数、斑块密度、聚集度指数和景观形状指数共 4 个指数^[28]。

1.3.4 碳储量评估

采用 InVEST 模型评估碳储量。InVEST 模型将生态系统碳库分为 4 个主要部分: 地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳^[29]。模型碳储量模块计算公式为:

$$C_i = C_{i1} + C_{i2} + C_{i3} + C_{i4}.$$

式中: i 表示某种土地利用类型; C_i 表示土地利用类型 i 的总碳密度, t/hm^2 ; C_{i1} 、 C_{i2} 、 C_{i3} 和 C_{i4} 分别表示土地利用类型 i 地上、地下、土壤和死亡碳密度, t/hm^2 。

本研究中, 碳密度数据通过查阅文献^[23-26]获得(表 1)。由于死亡堆积碳密度在碳库中所占比例较小^[30-33], 因此在本研究中不予考虑。

1.3.5 灰色关联分析

采用灰色关联分析法进一步量化景观格局指数与碳储量之间的相关性^[34]。灰色关联分析旨在量化各因素之间的关联程度, 并表征各因素间发展趋势的相似或相异程度。如 x_1, x_2, \dots, x_n 为

表 1 梁王山自然保护区三大碳库碳密度值

Tab. 1 Carbon density values of three carbon pools in Liangwang Mountain Nature Reserve t/hm^2

土地利用 类型 land use type	地上碳密度 above ground carbon density	地下碳密度 underground carbon density	土壤碳密度 soil carbon density
建设用地 construction land	0	0	62.80
未利用地 unused land	13.04	1.18	61.90
林地 forestland	41.89	10.39	65.70
耕地 cultivated land	4.11	0.95	59.30
草地 grassland	8.40	1.72	46.70

N 个因素, 反应各因素变化特性的数据列分别为 $\{x_1(t)\}, \{x_2(t)\}, \dots, \{x_n(t)\}, t = 1, 2, \dots, M$ 。两者间关联度的计算公式为:

$$\gamma \approx \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \varepsilon_{ij}(t);$$

$$\varepsilon_{ij}(t) = \frac{\Delta_{\min} + R\Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(t) + R\Delta_{\max}}.$$

式中: γ 为比较数列 x_j 对参考数列 x_i 的关联度。若 x_j 与 x_i 的关联度大, 则表明 x_j 为对 x_i 影响最大的因素。 $\varepsilon_{ij}(t)$ 表示因素 x_j 对 x_i 在 t 时刻的关联系数; $\Delta_{ij}(t) = |x_i(t) - x_j(t)|$; $\Delta_{\max} = \max_j \max_i \Delta_{ij}(t)$; $\Delta_{\min} = \min_j \min_i \Delta_{ij}(t)$; R 为介于 $[0, 1]$ 区间上的分辨率系数, 通常取值 0.5。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化特征

由图 2 可知: 保护区内土地利用类型主要以林地和草地为主; 各地类在空间分布上存在较强的空间分异性, 其中耕地集中分布于西南区域, 草地主要分布于中部区域。

从各地类变化来看(表 2): 2000—2020 年间, 保护区内耕地和未利用地面积大幅减少, 且以耕地减少量最大, 共计减少了 77.60 hm^2 , 占比为 3.29%; 草地、建设用地和林地面积均得到增加, 其中建设用地增加 15.08 hm^2 , 占比为 0.64%。

从土地利用动态度来看(表 3): (1) 单一土地利用动态度中, 耕地、草地和林地 20 年间变化较为剧烈, 建设用地和未利用地动态度变化相对较小, 均在 1% 以下。建设用地在 2010—2015 年呈现增加趋势, 为 5.10%; 林地在 2010—2015 年

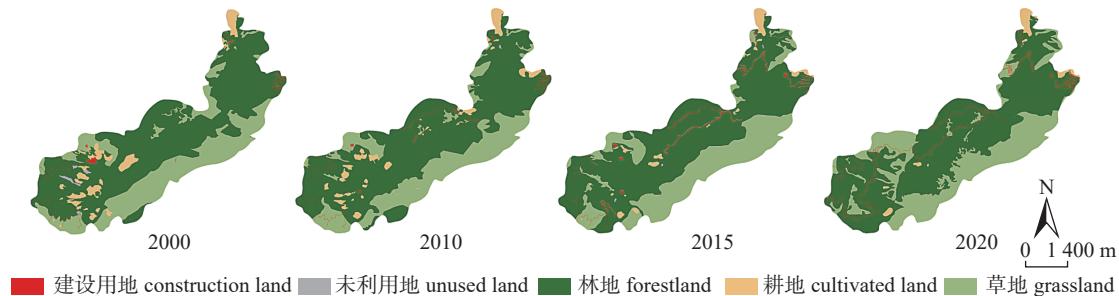


图2 2000—2020年梁王山自然保护区土地利用变化

Fig. 2 Land use change in Liangwang Mountain Nature Reserve from 2000 to 2020

表2 2000—2020年梁王山自然保护区不同土地类型面积变化

Tab. 2 Area change of different land types in Liangwang Mountain Nature Reserve from 2000 to 2020

土地利用类型 land use type	2000		2010		2015		2020	
	面积/hm ² area	比例/% proportion						
建设用地 construction land	13.46	0.57	11.32	0.48	36.80	1.56	28.54	1.21
未利用地 unused land	9.43	0.40	0.71	0.03	1.42	0.06	0.24	0.01
林地 forestland	1501.37	63.65	1601.62	67.90	1555.38	65.94	1525.19	64.66
耕地 cultivated land	125.01	5.30	103.55	4.39	61.56	2.61	47.41	2.01
草地 grassland	709.52	30.08	641.59	27.20	703.63	29.83	757.41	32.11

表3 2000—2020年梁王山自然保护区土地利用动态变化

Tab. 3 Dynamic degree of land use in Liangwang Mountain Nature Reserve from 2000 to 2020 %

土地利用类型 land use type	2000—2010—2015—2020— 2010 2015 2020 2020			
	2000— 2010	2010— 2015	2015— 2020	2020— 2020
建设用地 construction land	-0.21	5.10	-1.65	0.75
未利用地 unused land	-0.87	0.14	-0.24	-0.46
林地 forestland	10.03	-9.25	-6.04	1.19
耕地 cultivated land	-2.15	-8.40	-2.83	-3.88
草地 grassland	-6.79	12.41	10.76	2.39
综合土地利用动态度 comprehensive land use dynamic degree	0.71	1.50	1.57	0.55

减少态势明显，减少 9.25%；唯有耕地在 3 个研究时段内均处在负变化，面积不断减少，表明保扩区内退耕还林政策得到有效落实。(2) 综合土地利用动态度总体表现为不断增加的趋势，在 2000—2010 年间为 0.71%，说明土地利用变化整体较为平稳；而在 2015—2020 年间为 1.57%，表明该时段土地利用变化较为剧烈。

土地利用转移矩阵结果显示(表4)：2000—2010 年，耕地与草地向林地大量转移，分别转入 49.17 和 143.16 hm²，林地面积得到有效增加；但 2010—2020 年，林地向建设用地和草地的转移较为频繁，其中林地向建设用地转移 34.48 hm²，表明保护区的建设占用了部分林地，而耕地和草地也是建设用地增加的主要贡献源，分别转入 6.09 和 5.70 hm²。

2.2 景观格局变化特征

2.2.1 景观层面

由表5可知：2000—2020 年，研究区景观形状及聚集度相关指数(斑块形状指数、周长面积分维数、蔓延度指数、斑块数量、斑块密度)都呈现整体上升趋势。以景观形状指数与周长面积分维数为例，分别从 2000 年的 4.91 和 1.25 上升到 2020 年的 5.43 和 1.29，表明景观形状逐步趋于复杂与不规则化。蔓延度指数、斑块数量和斑块密度的上升则表明景观内优势斑块连通性加强，但景观整体破碎度上升。从景观多样性来看，香农多样性指数和香农均匀度指数值均表现为总体下降趋势，20 年间分别下降 0.03 和 0.02，

表 4 2000—2020 年梁王山自然保护区土地类型转移矩阵

Tab. 4 Land transfer matrix in Liangwang Mountain Nature Reserve from 2000 to 2020 hm²

土地利用类型 land use type	研究时间段 time	建设用地 construction land	未利用地 unused land	林地 forestland	耕地 cultivated land	草地 grassland
建设用地 construction land	2000—2010	2.59	0	5.87	2.92	2.08
	2010—2015	7.39	0	2.40	0.98	0.55
	2015—2020	11.67	0	19.52	0.09	5.52
未利用地 unused land	2000—2020	4.43	0	5.77	1.14	2.12
	2000—2010	1.09	0.11	6.20	0.12	1.91
	2010—2015	0	0.41	0.30	0	0
林地 forestland	2015—2020	0.01	0.01	0.90	0.26	0.24
	2000—2020	0.37	0.06	4.35	0.05	4.60
	2000—2010	5.60	0.08	1397.22	24.33	74.14
耕地 cultivated land	2010—2015	21.60	0.66	1412.06	15.67	151.63
	2015—2020	12.88	0.15	1364.77	8.28	169.30
	2000—2020	17.14	0.12	1262.30	14.52	207.29
草地 grassland	2000—2010	0.46	0.50	49.17	67.65	7.23
	2010—2015	5.04	0.35	47.73	41.90	8.53
	2015—2020	1.05	0.04	13.76	38.77	7.94
草地 grassland	2000—2020	2.69	0.02	69.79	30.26	22.25
	2000—2010	1.58	0	143.16	8.53	556.25
	2010—2015	2.77	0	92.89	3.01	542.92
耕地 cultivated land	2015—2020	2.93	0.04	126.24	0.01	574.41
	2000—2020	3.91	0.04	182.98	1.44	521.15

表 5 2000—2020 年梁王山自然保护区
景观层面格局指数变化Tab. 5 General trends of landscape indexes at landscape
level in Liangwang Mountain Nature Reserve
from 2000 to 2020

指数 indexes	2000	2010	2015	2020
景观形状指数 landscape shape index	4.91	4.65	5.23	5.43
周长面积分维数 perimeter area fractal dimension	1.25	1.22	1.28	1.29
蔓延度指数 contagion index	68.83	69.91	69.21	69.41
斑块数量 number of patches	132	124	259	207
斑块密度 patch density	2.10	1.91	4.12	3.22
香农均匀度指数 Shannon's evenness index	0.54	0.52	0.53	0.52
香农多样性指数 Shannon's diversity index	0.97	0.94	0.95	0.94

表明自然保护区内景观异质性与均匀度降低。

2.2.2 斑块类型层面

由表 6 可知: 建设用地景观形状指数和斑块密度均呈上升趋势, 其中景观形状指数值由 7.20 上升至 14.81, 表明 20 年间建设用地形状逐渐趋

于复杂化且斑块破碎程度增大; 而耕地景观形状指数和斑块密度则呈降低态势, 景观形状趋向于规则化与简单化。研究期内林地的最大斑块指数一直维持在较高水平并缓慢提升, 由 2000 年的 23.00 上升至 2020 年的 23.80, 表明保护区内仍有大量优势斑块, 即面积较大且完整的林地。2015—2020 年间草地斑块聚集度下降明显, 由 94.80 下降到 91.75, 表明近期草地趋于分散, 团聚程度下降。

2.3 碳储量变化特征

2.3.1 时间变化

由表 7 可知: 2000—2020 年, 保护区总碳储量呈先增后减的总体变化趋势, 2000—2010 年共增加 5 788.22 t, 2010—2020 年共减少 5 003.57 t, 但整体而言, 20 年间研究区总碳储量增加了 784.65 t。从各地类碳储量时间变化来看, 2000—2010 年, 林地总碳储量共增加 11 827.33 t, 而同时期其他地类碳储量均呈下降趋势, 表明林地总碳储量的增加是该时段保护区总碳储量上升的重要原因; 2010—2020 年, 草地和建设用地总碳储

表6 2000—2020年梁王山自然保护区斑块类别层面景观格局指数变化

Tab. 6 General trends of landscape indexes at patch level in Liangwang Mountain Nature Reserve from 2000 to 2020

土地利用类型 land use type	研究时间 study time	景观形状指数 landscape shape index	斑块密度 patch density	最大斑块指数 largest patch index	聚集度指数 aggregation index
建设用地 construction land	2000	7.20	0.83	0.07	41.95
	2010	8.52	1.03	0.02	22.42
	2015	13.86	1.56	0.05	33.17
	2020	14.81	2.43	0.02	17.47
未利用地 unused land	2000	3.48	0.11	0.07	72.49
	2010	1.17	0.02	0.01	87.50
	2015	2.33	0.06	0.01	55.56
	2020	1.25	0.01	0.01	50.00
林地 forestland	2000	6.32	0.14	23.00	95.83
	2010	6.11	0.09	24.24	96.13
	2015	6.79	0.05	24.03	95.53
	2020	7.32	0.08	23.80	95.10
耕地 cultivated land	2000	6.96	0.37	0.39	83.43
	2010	6.71	0.44	0.40	82.62
	2015	5.30	0.28	0.40	82.61
	2020	3.83	0.19	0.41	87.05
草地 grassland	2000	6.38	0.23	7.47	93.84
	2010	6.07	0.28	6.71	93.89
	2015	5.53	0.22	7.39	94.80
	2020	8.46	0.45	9.79	91.75

表7 2000—2020年梁王山自然保护区碳储量

Tab. 7 Carbon storage in Liangwang Mountain Nature Reserve from 2000 to 2020

土地利用类型 land use type	碳储量 carbon storage				固碳量 carbon sequestration		
	2000	2010	2015	2020	2000—2010	2010—2015	2015—2020
建设用地 construction land	844.35	711.03	2310.86	1792.40	-133.32	1599.82	-518.46
未利用地 unused land	718.20	53.87	107.73	17.96	-664.34	53.86	-89.78
林地 forestland	117131.72	188959.05	183504.56	179942.45	11827.33	-5454.48	-3562.11
耕地 cultivated land	8046.03	6664.54	3962.29	3051.42	-1381.49	-2702.25	-910.87
草地 grassland	40315.18	36455.22	39980.11	43035.92	-3859.96	3524.90	3055.80
总碳储量 total carbon storage	227055.48	232843.71	229865.56	227840.14	5788.22	-2978.15	-2025.42

量分别增加6580.70和1081.36 t, 耕地和未利用地碳储量则呈现整体下降态势, 与地类面积变化保持一致。

2.3.2 空间变化

由图3可知: 2000—2020年, 碳储量高值区域主要集中于东北和中部区域, 西南区域碳储能力相对较弱。20年间研究区碳储量空间变化特征

不尽相同, 其中, 东北区域碳储量相对稳定; 西南区域碳储量变化较明显, 高碳储量斑块增多, 碳储量总体呈缓慢上升的趋势; 中部区域碳储量随着低碳储量斑块的增多而总体呈下降态势。

2.4 景观格局与总碳储量的相关性

由表8可知: 各景观指数对总碳储量影响大小顺序依次为蔓延度指数、香农均匀度指数、香

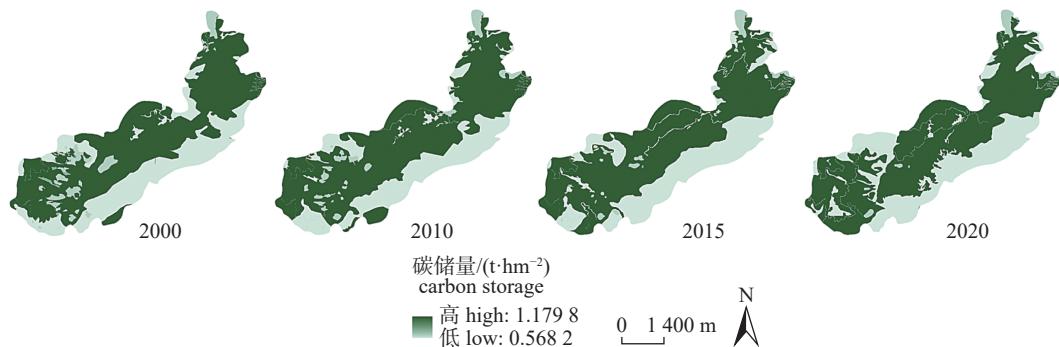


图3 2000—2020年梁王山自然保护区碳储量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of carbon storage in Liangwang Mountain Nature Reserve from 2000 to 2020

表8 梁王山自然保护区景观指数与总碳储量灰色关联度分析

Tab. 8 Grey relational grade analysis between landscape indexes and total carbon storage in Liangwang Mountain Nature Reserve

项目 item	景观形状指数 landscape shape index	周长面积分维数 perimeter area fractal dimension	蔓延度指数 contagion index	斑块数量 number of patches	斑块密度 patch density	香农均匀度指数 Shannon's evenness index	香农多样性指数 Shannon's diversity index
2000年总碳储量 total carbon storage in 2000	0.93	0.99	0.99	0.47	0.48	0.89	0.89
2010年总碳储量 total carbon storage in 2010	0.71	0.84	0.98	0.41	0.40	0.92	0.92
2015年总碳储量 total carbon storage in 2015	0.88	0.94	0.99	0.35	0.34	0.99	0.98
2020年总碳储量 total carbon storage in 2020	0.74	0.89	0.98	0.60	0.62	0.99	1.00
关联度 relevancy	0.82	0.91	0.99	0.45	0.46	0.95	0.94
关联序 relativity order	5	4	1	7	6	2	3

农多样性指数、周长面积分维数、景观形状指数、斑块密度、斑块数量。其中, 蔓延度指数对总碳储量关联度最大, 高达 0.99, 表明优势斑块的连通性和延展性与研究区总碳储量变化相关性最高; 香农均匀度指数、香农多样性指数和周长面积分维数关联度均在 0.9 以上, 表明景观空间分布、多样性以及人类的扰动程度均与总碳储量变化存在较大相关性; 而斑块密度和斑块数量的关联度仅为 0.46 和 0.45, 表明景观层面斑块数量和破碎化程度与总碳储量变化关联度较小。可见, 不同景观格局指数与碳储量的相关性存在差异, 该研究区表征优势地类和人类扰动程度相关指标明显高于表征斑块破碎化程度指标的相关性。

3 讨论

本研究表明: 2000—2020 年间研究区土地利用变化明显, 主要体现在林地、耕地和草地三者之间的大量转移以及建设用地对林地的侵占; 景

观形状趋于复杂化, 破碎度增加, 异质性减弱。首先, 这与梁王山自然保护区的发展定位转变有关。随着自然保护区的建立, 退耕还林和人口迁移等生态环境保护政策的实施, 保护区在 2000—2010 年间生态环境得到有效恢复, 生态用地面积得到有效提升。但近年来对保护区旅游开发潜力的进一步发掘, 使得道路系统扩张趋势明显, 建设用地面积也得以增加。2010—2020 年间, 基础设施建设占用了大量林地, 林地向其他地类的转移也进一步加剧了后 10 年间土地利用变化程度。其次, 这与人类干扰程度密切相关。研究区研究初期人类活动干扰程度较小, 景观斑块形状趋于简单化, 连通性和聚集性相对较好; 后 10 年间随着人类活动的侵扰, 景观格局变化越发复杂, 为了开发建设的需要, 建设用地面积与破碎化程度增加的同时, 也割裂了其他地类之间的连接性, 整体景观破碎度增大, 景观形状趋于复杂; 而耕地和未利用地的不断减少, 则进一步降

低了研究区的景观异质性。

本研究还发现：梁王山总碳储量虽然呈现先增后减的变化趋势，但总体得到提升。总碳储量变化与林地面积密切相关。前10年总碳储量增加，主要原因是作为碳密度最高的林地面积得到大幅提升；而后10年间，随着保护区内人类扰动的增强，林地被建设用地以及草地大量占用，土地利用的变化直接造成高碳密度地类向低碳密度地类的转移，因此，总碳储量有所下降。景观指数中，蔓延度指数与总碳储量的关联度最高，进一步说明总碳储量变化趋势与林地面积变化高度相关。蔓延度指数表征优势地类的聚集程度和延展程度，在空间分布中，保护区优势地类为林地，林地斑块“以点成面”变化或其他地类向林地的转移均会提升蔓延度指数，且林地为碳密度最高的地类，因此蔓延度指数与林地面积变化高度相关，同时也表明林地面积是区域总碳储量变化的重要影响因素。此外，香农多样性指数、香农均匀度指数和周长面积分维数均与人类活动干扰密切相关，在2000—2010年间随着大量人口的迁出以及建设用地和耕地的减少，自然保护区人为干扰程度明显下降，该时段保护区碳储量显著增加，而后10年间人为因素扰动有所增强，总碳储量在该时段又呈现下降趋势，这与关联度分析结果一致。而斑块密度和斑块数量与碳储量关联度较小，原因在于斑块破碎化程度与斑块数量并不能较好地表征斑块面积变化，而碳储量主要取决于各地类的面积与碳密度。综上所述，未来梁王山自然保护区增加林地面积、减少人为活动干扰是增加总碳储量的良策，这与已有研究结果^[25, 35]相同，人类扰动的增加^[25]和林地的减少^[35]都会导致碳储量下降。

国内外学者对不同尺度与区域下陆地生态系统的碳储量估算方法不尽相同^[8, 16]。本研究证明：InVEST模型在县级保护区等较小尺度区域的碳储量研究中具有适用性，这与已有研究结果^[16, 25, 35]相似。相关研究发现：碳密度受到气候、水文条件和地形地貌等多重因素的影响^[36]；而本研究在构建InVEST模型过程中，借鉴云南省有关碳密度研究成果，降低了大多数学者使用全国各地类碳密度所造成的误差^[19]，研究结果对于未来研究区土地利用以及维护区域生态系统碳储存功能的稳定具有一定借鉴作用。但本研究InVEST模型

的运行主要借助不同土地利用类型的静态碳密度值，未充分考虑碳密度的动态变化。因此，未来研究中，需要获取更加长期和动态的碳密度数据，以减少静态碳密度值的不确定性。

4 结论

梁王山自然保护区地类以林地和草地为主，受人类活动影响，20年间林地、草地和建设用地面积有不同程度的增加，三者间的转移尤为突出。土地利用方式变化使得梁王山自然保护区碳储量呈先增后减的趋势，但总体略有增加，碳储量共增加784.65 t。空间分布上，碳储量高值区主要集中于东北和中部区域，西南区域碳储能力相对较弱。不同景观格局指数与碳储量的相关性存在差异，梁王山自然保护区景观蔓延度指数与碳储量变化相关性最高，而林地作为优势斑块，其面积的增加有利于保护区总碳储量增加。

[参考文献]

- [1] KEER R A. Global warming is changing the world[J]. Science, 2007, 316(5822): 188. DOI: [10.1126/science.316.5822.188](https://doi.org/10.1126/science.316.5822.188).
- [2] 陈琼, 张镱锂, 刘峰贵, 等. 黄河流域河源区土地利用变化及其影响研究综述[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 446. DOI: [10.18402/resci.2020.03.04](https://doi.org/10.18402/resci.2020.03.04).
- [3] 刘彦随, 陈百明. 中国可持续发展问题与土地利用/覆盖变化研究[J]. 地理研究, 2002, 21(3): 324. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0585.2002.03.007](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0585.2002.03.007).
- [4] 傅伯杰, 陈利顶, 王军, 等. 土地利用结构与生态过程[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 247. DOI: [10.3321/j.issn1001-7410.2003.03.002](https://doi.org/10.3321/j.issn1001-7410.2003.03.002).
- [5] 陈美景, 王庆日, 白中科, 等. 碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应: 以贵州省为例[J]. 中国土地科学, 2021, 35(11): 101. DOI: [10.11994/zgtdkx.20211112.143927](https://doi.org/10.11994/zgtdkx.20211112.143927).
- [6] 岳婷, 李梦婷, 陈红, 等. 碳中和研究热点与演进趋势: 基于科学知识图谱[J]. 资源科学, 2022, 44(4): 701. DOI: [10.18402/resci.2022.04.05](https://doi.org/10.18402/resci.2022.04.05).
- [7] 彭建, 王仰麟, 张源, 等. 滇西北生态脆弱区土地利用变化及其生态效应: 以云南省永胜县为例[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 629. DOI: [10.3321/j.issn:0375-5444.2004.04.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:0375-5444.2004.04.018).
- [8] 李威, 黄政, 张远东, 等. 中国国家森林公园碳储量及固碳速率的时空动态[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 799. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202103.015](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202103.015).
- [9] 张佑铭, 郎梦凡, 刘梦云, 等. 土地利用转变与海拔高度协同作用下黄土高原植被固碳变化特征[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 3897. DOI: [10.5846/stxb202106211643](https://doi.org/10.5846/stxb202106211643).

- [10] 冯源, 肖文发, 朱建华, 等. 造林对区域森林生态系统碳储量和固碳速率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(3): 281. DOI: [10.19741/j.issn.1673-4831.2019.0254](https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2019.0254).
- [11] 张雄伟, 李刚, 董宽虎, 等. 山西主要草地类型土壤有机碳储量及其垂直分配特征[J]. 中国草地学报, 2020, 42(1): 141. DOI: [10.16742/j.zgedxb.20190106](https://doi.org/10.16742/j.zgedxb.20190106).
- [12] YANG Y, TILMAN D, FUREY G, et al. Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 718. DOI: [10.1038/s41467-019-10863-w](https://doi.org/10.1038/s41467-019-10863-w).
- [13] 孔祥斌, 胡莹洁, 李月, 等. 北京市耕地表层土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 资源科学, 2019, 41(12): 2307. DOI: [10.18402/resci.2019.12.14](https://doi.org/10.18402/resci.2019.12.14).
- [14] 张萌萌, 刘梦云, 常庆瑞, 等. 陕西黄土台塬近三十年耕地动态变化的表层土壤有机碳效应[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6785. DOI: [10.5846/stxb201805251151](https://doi.org/10.5846/stxb201805251151).
- [15] 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. DOI: [10.11849/zrzyxb.2013.07.018](https://doi.org/10.11849/zrzyxb.2013.07.018).
- [16] 向书江, 张骞, 王丹, 等. 近20年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆盖变化的响应及脆弱性分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1198. DOI: [10.31497/zrzyxb.2022.0507](https://doi.org/10.31497/zrzyxb.2022.0507).
- [17] ISLAM I, CUI S H, HOQUE M Z, et al. Dynamics of tree outside forest land cover development and ecosystem carbon storage change in eastern coastal zone, Bangladesh[J]. Land, 2022, 11(1): 76. DOI: [10.3390/LAND11010076](https://doi.org/10.3390/LAND11010076).
- [18] AITALI R, SNOUSSI M, KOLKER A S, et al. Effects of land use/land cover changes on carbon storage in north African Coastal Wetlands[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(3): 364. DOI: [10.3390/JMSE10030364](https://doi.org/10.3390/JMSE10030364).
- [19] 任玺锦, 裴婷婷, 陈英, 等. 基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响[J]. 生态科学, 2021, 40(4): 66. DOI: [10.14108/j.cnki.1008-8873.2021.04.008](https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2021.04.008).
- [20] 丛文翠, 孙小银. 基于GIS和InVEST模型的日照市固碳能力研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 200. DOI: [10.13961/j.cnki.stbzb.2018.05.032](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbzb.2018.05.032).
- [21] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4052. DOI: [10.5846/stxb201911152452](https://doi.org/10.5846/stxb201911152452).
- [22] 李潇, 杨加猛. 盐城珍禽自然保护区景观格局分析[J]. 南京林业大学学报(人文社会科学版), 2021, 21(5): 97. DOI: [10.16397/j.cnki.1671-1165.202105097](https://doi.org/10.16397/j.cnki.1671-1165.202105097).
- [23] 燕腾, 彭一航, 王效科, 等. 云南省森林生态系统植被碳储量及碳密度估算[J]. 西部林业科学, 2015, 44(5): 62. DOI: [10.16473/j.cnki.xblykx1972.2015.05.012](https://doi.org/10.16473/j.cnki.xblykx1972.2015.05.012).
- [24] 朱超, 赵淑清, 周德成. 1997—2006年中国城市建成区有机碳储量的估算[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1195. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2012.0165](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2012.0165).
- [25] 张靖宙, 吴秀芹, 肖桂英. 云南省建水县不同石漠化治理模式下碳储量功能评估[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(8): 72. DOI: [10.13332/j.1000-1522.20180069](https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20180069).
- [26] PAUSTIAN K, RAVIND N H, AIMSTEL A V. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. International Panel on Climate Change, 2006.
- [27] 吴金华, 房世峰, 刘宝军, 等. 乌裕尔河—双阳河流域湿地景观格局演变及其驱动机制[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4279. DOI: [10.5846/stxb201911042316](https://doi.org/10.5846/stxb201911042316).
- [28] QIN F Y, FUKAMACHI K, SHIBATA S. Land-use/landscape pattern changes and related environmental driving forces in a Dong ethnic minority village in southwestern China[J]. Land, 2022, 11(3): 349. DOI: [10.3390/land11030349](https://doi.org/10.3390/land11030349).
- [29] 钟莉娜, 王军, 白中科, 等. 农用地整理对区域景观动态与生态风险影响研究: 以福建省建溪流域为例[J]. 中国土地科学, 2019, 33(1): 73. DOI: [10.11994/zgtdkx.20181101.143629](https://doi.org/10.11994/zgtdkx.20181101.143629).
- [30] POTTER C S, KLOOSTER S A. Global model estimates of carbon and nitrogen storage in litter and soil pools: response to changes in vegetation quality and biomass allocation[J]. Tellus, 1997, 49B: 1. DOI: [10.1034/j.1600-0889.49.issue1.1.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.49.issue1.1.x).
- [31] 周汝波, 林媚珍, 吴阜, 等. 珠江西岸生态系统碳储量对土地利用变化的响应[J]. 生态科学, 2018, 37(6): 175. DOI: [10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.06.023](https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.06.023).
- [32] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估: 以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 446. DOI: [10.11821/dlxz201903004](https://doi.org/10.11821/dlxz201903004).
- [33] 李姣, 汪杰, 李朗, 等. 洞庭湖生态经济区土地利用变化对碳储量的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(6): 1156. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202206.026](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202206.026).
- [34] 朱静静, 师学义. 黄土丘陵山区土地利用空间自相关格局及其影响因素分析: 以晋城市长河流域为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 234. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2018.05.034](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2018.05.034).
- [35] 朱建佳, 戴尔阜, 郑度, 等. 采伐影响下人工林木材生产与固碳功能权衡特征: 以湖南会同森林生态实验站为例[J]. 地理学报, 2018, 73(1): 152. DOI: [10.11821/dlxz201801013](https://doi.org/10.11821/dlxz201801013).
- [36] LI L, SONG Y, WEI X H, et al. Exploring the impacts of urban growth on carbon storage under integrated spatial regulation: a case study of Wuhan, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 111(3): 106064. DOI: [10.1016/j.ecolind.2020.106064](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106064).

责任编辑: 何馨成