喀斯特地区碳储量与景观格局时空演变与预测

孙载瑞 尹露曦 杨 智

昆明理工大学建筑与城市规划学院 昆明 650500

摘要：【目的】探究喀斯特地区土地利用变化对区域碳储量与景观破碎度的影响以及两者的关系，旨在为喀斯特地区生态环境治理提供科学支持。【方法】以曲靖市为例，利用 InVEST 测算分析 2000—2030 年曲靖市碳储量，通过 Fragstat 与 PIUS 耦合模型计算曲靖市景观破碎度，并探讨两者的相关性。【结果】1）曲靖市 2000—2020 年碳储量整体呈现下降趋势，空间分布呈东北高西南低的特征；景观破碎度呈下降趋势。土地利用类型以耕地、林地和草地为主，土地转移主要发生于这三者间。草地流失与建设用地扩张是曲靖市碳储量流失的核心原因。2）在自然发展情景、耕地保护情景、石漠化治理情景 3 种模拟情景下，碳储量变化分别为 -148.07×10^4、-162.60×10^4、60.94×10^4 t，表明石漠化治理有利于提高区域碳储能力。3）3 种情景下，景观破碎度综合指数分别为 0.457、0.385、0.490，表明耕地保护情景最有益于降低景观破碎度。【结论】在喀斯特地区，景观破碎度与碳储量存在显著的正相关关系。建议在进行土地利用规划时，应优先界定保护高碳汇生态核心区，通过廊道连通孤立生态斑块，降低景观破碎度，维持生态系统的连续性与完整性。

关键词：碳储量；景观格局；喀斯特；时空演变

DOI：10.12169/zgscly.2024.09.16.0002

Spatial and Temporal Evolution of Carbon Stocks and Landscape Pattern in Karst Region and Its Prediction

Sun Zairui Yin Luxi Yang Zhi

(Faculty of Architecture and City Planning, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: 【Objective】 To explore the impact of land use changes on regional carbon storage and landscape fragmentation in karst regions and their interrelationship, with the aim to provide scientific support for ecological environment management in karst areas, which holds significant importance for achieving "dual carbon" goals and sustainable development. 【Method】 Taking Qujing City as an example, this study uses the InVEST model to calculate and analyze carbon storage from 2000 to 2030. The landscape fragmentation is also calculated using a coupled Fragstats and PLUS model. The correlation between the two is discussed. 【Result】 1) From 2000 to 2020, the carbon storage in Qujing City generally shows a downward trend, with a spatial distribution characterized by higher values in the northeast and lower values in the southwest. Landscape fragmentation also exhibits a reversing trend. The dominant land uses are cultivated land, forest land, and grassland, all of which contribute to the majority of land transfers. Grassland loss and construction land expansion are the core reasons for carbon storage loss in Qujing City; 2) Under the three scenarios of natural development, cropland protection, and rocky desertification control, the changes of carbon stock are -148.07×10^4t, -162.60×10^4t, and 60.94×10^4t, respectively, which indicates that rocky desertification control is conducive to the enhancement of regional

收稿日期：2024-09-16

第一作者：孙载瑞（2000-），男，硕士生，研究方向为风景园林规划与设计。E-mail：2249025615@qq.com

通信作者：尹露曦（1990-），女，博士，讲师，研究方向为风景园林规划与设计。E-mail：1030869612@qq.com

carbon storage capacity; and 3) The comprehensive indices of landscape fragmentation under the three scenarios are 0.457, 0.385, and 0.490, respectively, indicating that the cultivated land protection scenario is most beneficial for reducing landscape fragmentation.【Conclusion】In the karst region, there is a significant positive correlation between landscape fragmentation and carbon stock. It is recommended that during land use planning, priority should be given to delimiting and protecting high-carbon-sink ecological core areas. Connectivity among isolated ecological patches should be enhanced through ecological corridors to reduce landscape fragmentation and maintain the continuity and integrity of ecosystems.

Keywords: carbon stock; landscape pattern; karst; spatial and temporal evolution

我国在 2020 年提出“双碳”战略目标以应对全球气候变化带给人类社会的威胁[1]，目标的实现依赖温室气体排放的减少和碳汇能力的增强[2]。土地利用变化作为影响陆地生态系统碳储量的关键因素[3]，通过直接作用于地表植被覆盖和土壤结构，间接调节着生态系统的碳循环[4-5]。城镇化的快速发展加快了土地利用转变，进而影响区域碳储量，严重威胁区域生态系统安全。科学合理估算碳储量有助于优化土地利用结构、增强城市碳汇能力。

目前碳储量估算多采用清查法和模型法[6-7]。清查法操作复杂，主要适用于小区域的研究。模型法操作便捷，能快速有效地评估大尺度区域的碳储量，降低时间成本。其中，InVEST 模型由于较低的数据需求、极快的计算时间，以及可视化碳储量时空分布等优点被广泛应用[8-10]。相关学者结合 InVEST 模型与不同土地利用预测模型从不同的尺度和视角进行了大量碳储量估算研究。例如：在县域尺度下，张靖宙等[11]利用 Dyna-CLUE 和 InVEST 模型，探究建水县碳储量的时空分布，得出石漠化治理对碳储量增加影响显著；在城市尺度下，张凯琪等[12]基于 InVEST 模型与 GeoSOS-FLUS 模型，分析模拟桂林市碳储量的时空变化，确定碳储量高值区为优先保护区域，并表明资源保护能有效提升区域固碳能力；在城市群尺度下，彭双云等[13]利用 InVEST 和 PLUS 模型，探究滇中城市群碳储量的时空演变规律，表明林地、耕地的转换对其碳储量具有显著影响；在省域尺度下，李倩等[14]利用 SD-PLUS 耦合模型，模拟 3 种情景陕西省碳储量的时空分布发现，在 SSP126 情景下最有益于陕西省国土资源保护和高质量发展。相比其他模型，PLUS 模型提高了土地利用类型的预测精度，弥补了传统模型的不足，从而也提高了碳储量估算的精确度[15-17]。

以往对碳储量的研究分别从历史与未来时间序列对各种尺度的地区进行探讨，但对于碳储量与景观格局的关系研究较少。例如：莫金宵等[18]、于小博等[19]、曾庆雨等[20]分别以自然保护区、绥棱县以及黄河流域为例，探讨单个景观格局指数与碳储量的关系。然而单个指数难以全面反映一个区域内景观破碎度的时空异质性分布特征。Zou 等[21]研究表明，构建景观破碎度综合指数可以有效解决这一问题。

景观破碎度作为衡量生态系统完整性和功能状态的指标，其变化直接影响碳储量的分布和动态[22]。由于人类活动和气候变化的影响，喀斯特地区的景观破碎度加剧，其独特的地质及其生态特性在生态系统的碳循环过程发挥着重要作用[23]。研究其碳储量与景观破碎度的关系显得极其重要。因此，本研究聚焦喀斯特地区城市未来多情景下的碳储能力与景观破碎度，以典型喀斯特地区曲靖市为例，通过 InVEST-PLUS 耦合模型，预测评估土地利用变化对其影响。首先，设置 3 种土地需求情景来分析和预测碳储量变化；其次，以景观破碎度综合指数探寻区域景观破碎度的时空异质性分布特征。研究旨在提供对生态系统服务变化的深入理解，明确景观破碎度与碳储量的关系，同时为喀斯特地区生态环境治理提供科学支持。

1　研究区概况

曲靖市（103° 03′—104° 32′ E，21° 21′—27°03′N）位于云南省东部，云贵高原中部，下辖 3 区、5 县、1 市，地势西北高、东南低，喀斯特

石漠化广泛发育，属于典型的生态环境脆弱区。曲靖市作为珠江发源地，生态区位特殊，在珠江源生态安全屏障的建立中承担着重要角色。此外，曲靖市是国家“一带一路”倡议、长江经济带战略、区域全面经济伙伴关系协定等经济规划的关键节点，经济区位极其重要。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

基础数据包括行政区划和土地利用数据，其中行政区划数据来源于全国地理信息资源目录服务系统；土地利用数据来源于中科院资源环境科学与数据中心，分辨率为 30 m×30 m。用于土地利用预测的驱动因子包括气候环境因子、社会经济因子、交通区位因子、限制因子 4 类。气候环境因子中年均降水、年均温度、土壤类型数据来源于中科院资源环境科学与数据中心，分辨率为 1 000 m×1 000 m；水系数据来源于全国地理信息资源目录服务系统；DEM 数据来源于地理空间数据云，分辨率为 30 m×30 m；坡度数据利用 Arcgis 提取 DEM 数据生成。社会经济因子包括 GDP、人口数据，来源于中科院资源环境科学与数据中心，分辨率为 1 000 m×1 000 m。交通区位因子包括至铁路、高速路、一级路、二级路、三级路的距离，数据均来源于全国地理信息资源目录服务系统，且由 Arcgis 欧氏距离生成。研究引入曲靖市内的自然保护区以及坡度 25°以上的林地、草地作为限制因子，其中自然保护区来源于全国地理信息资源目录服务系统；坡度 25°以上的林地、草地数据由 Arcgis 栅格计算器生成。所有数据的空间分辨率均在 Arcgis 中重采样至 30 m×30 m。曲靖市各类土地利用的碳密度数据如表 1 所示[24]。

表 1 曲靖市各土地类型碳密度 $t \cdot hm^{-2}$

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度
耕地	16.83	11.12	75.89	2.11
林地	30.76	18.40	100.24	2.78
草地	14.59	17.50	87.13	2.42
水域	1.62	0	64.09	1.78
建设用地	7.77	1.55	34.36	0
未利用地	10.57	2.11	34.45	0.96

2.2 InVEST 模型

InVEST 模型将生态系统的碳储量划分为四大碳库（地下生物量、地上生物量、土壤、死亡有机物），根据各类土地对应的碳密度计算总碳储量[13]。

2.3 PLUS 模型

PLUS 模型综合了土地扩张策略分析模块与元胞自动机模型，基于多类随机斑块种子能够精确地预测土地利用变化的空间动态过程。为确保 PLUS 模型模拟土地利用的精度，采用 FOM 值和 Kappa 系数对模型进行验证。利用 2000—2010 年土地利用变化，预测 2020 年的土地利用，最终与实际 2020 年土地利用数据对比验证。经检验 FOM 值为 0.37 大于 0.2；Kappa 系数为 0.87 大于 0.7，表明 PLUS 模型所模拟的土地利用结果准确性较高。

2.4 情景设置

设置自然发展、耕地保护、石漠化治理 3 种不同情景进行模拟（表 2）。

表 2 曲靖市 2020—2030 年多情景土地利用转移矩阵

2020 年	2030 年											
	FPS						RMS					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
b	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
d	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
e	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注：a：耕地，b：林地，c：草地，d：水域，e：建设用地，f：未利用地；1 表示允许发生转移，0 表示不允许发生转移。

自然发展情景（NDS）：依据 2010—2020 年发展趋势，各地类转移无任何限制（故不在表 2 体现），以原有土地利用转移概率模拟 2030 土地利用，转移概率通过各类用地扩张面积占总用地扩张的比率确定各类土地邻域权重。

耕地保护情景（FPS）：根据云南省《关于加强森林资源保护管理若干措施的令（2024 年第 2 号）》中规定“25°以上林地，禁止毁林复耕”，确定坡度 25°以上的林地为限制因子。根据《曲靖市国土空间总体规划（2021—2035 年）》中的土地保护政策，至 2035 年曲靖市耕地保有量不低

于 1 184.40 万亩（78.96 hm^2），以年均增量确定 2030 年耕地面积不低于 7 515.77 km^2。以耕地保护为第一准则，草地、水域、未利用地转为耕地的概率增加 40%，建设用地转为耕地的概率增加 15%。

石漠化治理情景（RMS）：以降低区域石漠化风险为目的，确定石漠化风险等级地类从高到低依次为未利用地、草地、耕地，同时将坡度 25°以上的林地、草地作为限制因子[25]。禁止石漠化风险高的向风险低的地类转移。设定其余地类向未利用地转移概率减少 30%，林地、草地、耕地向建设用地转移概率减少 20%。

2.5　景观数据提取

选取景观水平上的斑块密度（PD）、蔓延度指数（CONTAG）、分离度指数（DIVISION）、香农多样性指数（SHDI）作为景观格局指标[22]。利用 Fragstats 软件，基于土地利用数据，计算 2000—2030 年各评价单元的景观格局指标数据，利用熵值法将 4 项指标整合为景观破碎度综合指数。

3　结果与分析

3.1　土地利用与碳储量时空变化特征

20 年间（2000—2020 年），研究区以耕地、林地和草地为主（图 1）。研究期间仅草地呈急剧下降趋势，降幅高达 4.12%；其余 5 类用地类型的面积变化均呈上升趋势，建设用地增速最快，增幅高达 72.27%（图 2），耕地是其主要转入源。在碳储量方面，曲靖市碳储量呈不断下降趋势；在空间分布上，碳储量均呈现为东北高西南低的特征（图 3）。从行政区划看，以林地和草地为主的碳储量高值区域主要分布于会泽县、宣威市、师宗县；以耕地和草地为主的富源县、罗平县、马龙区碳储量水平居中；城市化程度较高，以耕地和建设用地为主的麒麟区、沾益区、陆良县的碳储量较低。

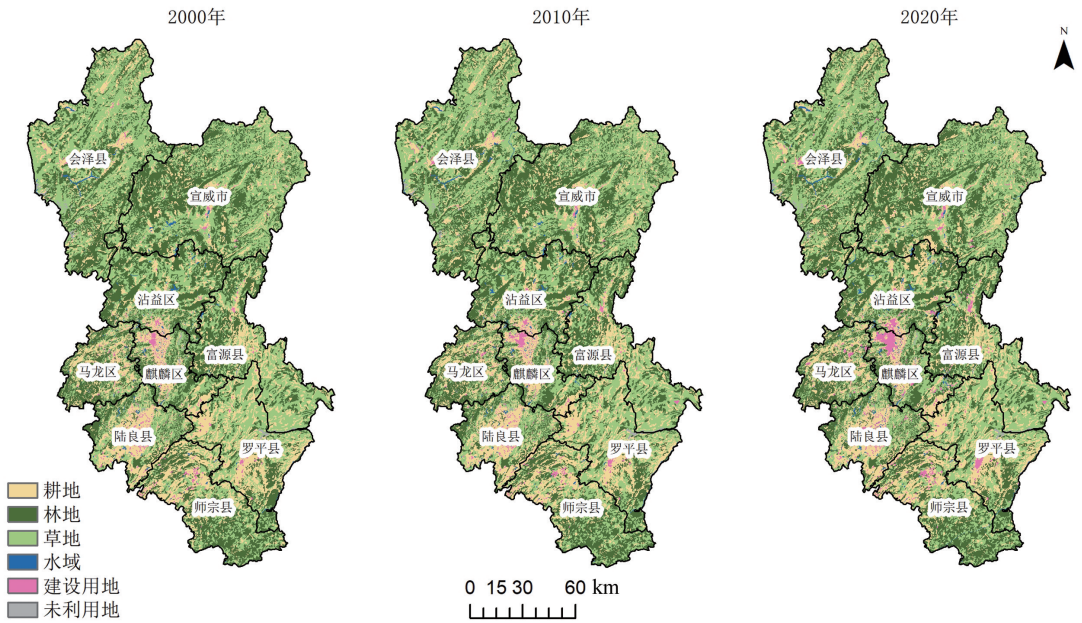


图 1　2000—2020 年曲靖市土地利用空间分布

3.2　曲靖市 2000—2020 年景观格局演变

由表 3 可知，20 年间，景观斑块密度与香农多样性指数持续上升，表明曲靖市景观破碎度与景观异质性不断增高；蔓延度指数不断下降，表明斑块破碎度增高且斑块间连通度降低；分离度指数基本不变，表明景观内部斑块组成的破碎程度趋于稳定。总体来看，20 年间曲靖市景观破碎度综合指数下降了 0.004，降幅达 0.79%。与此同时，草地缩减与建设用地扩张导致曲靖市碳储量逐年减少（表 4），损失量高达 187.27×10^4 t（表 5）。从历史的时间序列看，20 年间的碳储量变化与景观破碎度的变化趋势表明：景观破碎度综合指数与碳储量存在正相关关系。

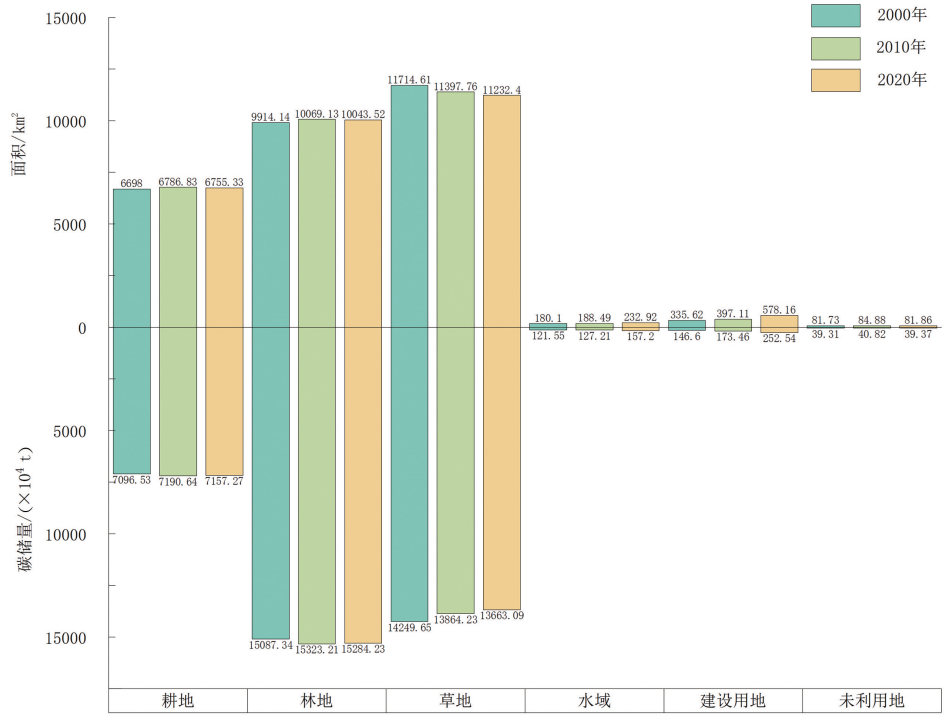


图 2 曲靖市 2000—2020 年各土地利用类型面积及碳储量变化

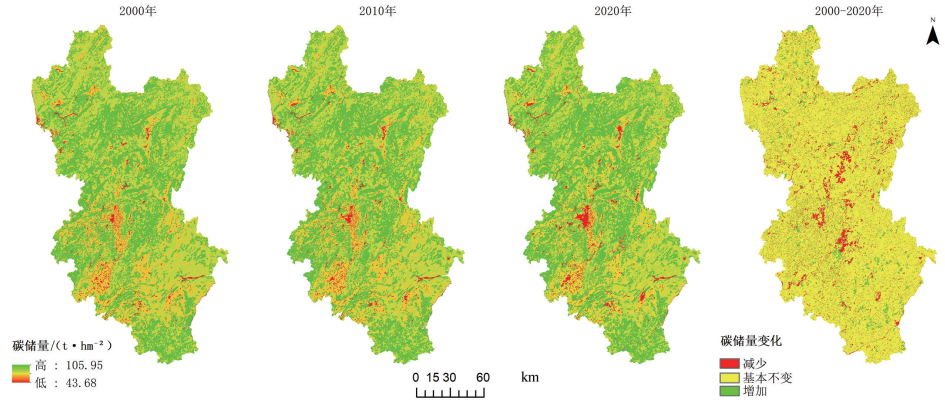


图 3 曲靖市 2000—2020 年碳储量空间分布及其变化

表 3 曲靖市 2000—2020 年土地利用对景观破碎度的影响

年份	斑块密度	蔓延度指数	分离度指数	香农多样性指数	景观破碎度综合指数
2000	0.365	62.049	0.975	1.172	0.502
2010	0.384	61.576	0.975	1.183	0.586
2020	0.404	60.794	0.979	1.208	0.498

表 4 曲靖市 2000 年—2020 年碳储量转移矩阵 ×10⁴t

2000 年	2020 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	0.00	102.38	67.72	−13.03	−134.61	−1.84
林地	−98.30	0.00	−175.87	−21.56	−20.26	−2.77
草地	−106.66	223.88	0.00	−17.41	−49.22	−4.62
水域	7.81	4.98	5.90	0.00	−0.63	−0.33
建设用地	27.95	3.39	5.36	0.63	0.00	0.02
未利用地	3.50	1.20	5.09	0.02	0.00	0.00

3.3 不同发展情景下土地利用与碳储量变化预测

由图 4~5 可知：自然发展情景因延续过去发展趋势，建设用地面积在 3 种情景中最大，草地为建设用地主要转入源；在耕地保护情景下，草地为耕地主要转入源，除水域外其余土地利用类型的面积均呈下降趋势；在石漠化治理情景下，林地面积显著增加，草地是林地的主要转入源，除耕地外其余土地利用类型的面积均呈下降趋势。

3 种情景下的碳储量由大到小依次为 MRS>NDS>FPS（表 5）。在石漠化保护情景下，碳储量增加 60.94×10⁴ t。图 6 显示，增长区域呈点状零

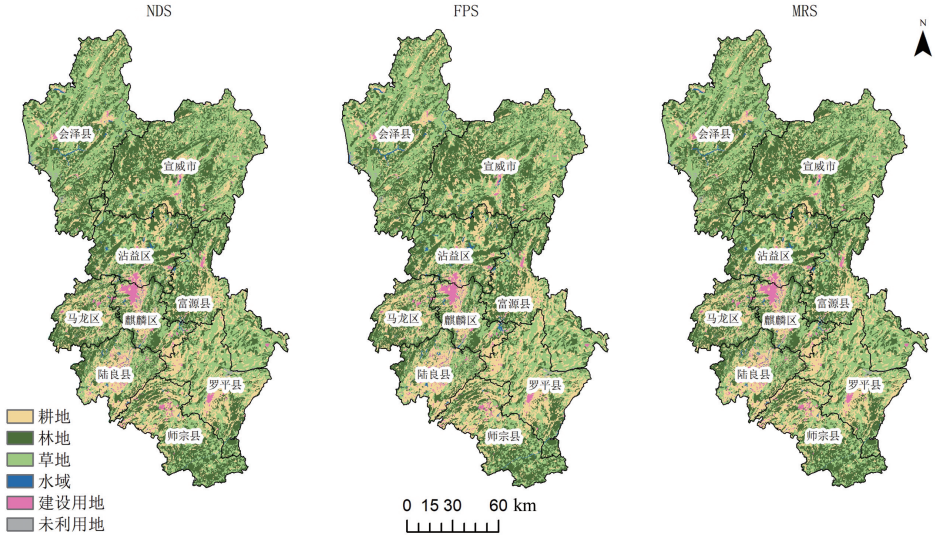


图 4　2030 年多情景下曲靖市土地利用空间分布

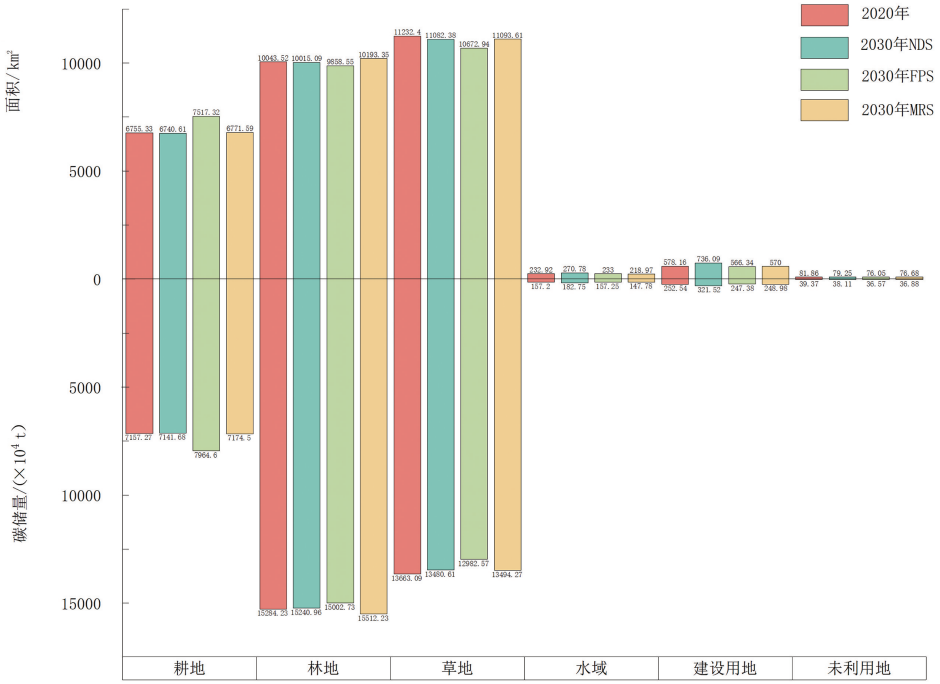


图 5　曲靖市 2030 年多情景下各土地利用类型面积及碳储量变化

表 5　曲靖市 2000—2030 年多情景下各区碳储量　　×10⁴ t

行政区	2000 年	2010 年	2020 年	2030 年 NDS	2030 年 FPS	2030 年 MRS
富源县	4 168. 60	4 159. 53	4 151. 49	4 139. 35	4 128. 54	4 155. 48
会泽县	7 506. 99	7 526. 65	7 514. 71	7 497. 01	7 487. 12	7 528. 68
陆良县	2 382. 94	2 378. 66	2 361. 27	2 343. 58	2 350. 91	2 366. 04
罗平县	3 633. 19	3 647. 70	3 635. 57	3 627. 17	3 612. 43	3 638. 63
马龙区	2 045. 71	2 047. 97	2 040. 42	2 037. 01	2 028. 75	2 046. 66
麒麟区	1 872. 84	1 847. 63	1 803. 08	1 774. 37	1 798. 09	1 807. 54
师宗县	3 540. 34	3 556. 68	3 542. 89	3 528. 07	3 526. 71	3 547. 60
宣威市	7 907. 25	7 893. 00	7 877. 17	7 850. 05	7 845. 76	7 889. 47
沾益区	3 683. 10	3 661. 75	3 627. 09	3 609. 02	3 612. 80	3 634. 53
总计	36 740. 97	36 719. 57	36 553. 70	36 405. 63	36 391. 10	36 614. 64

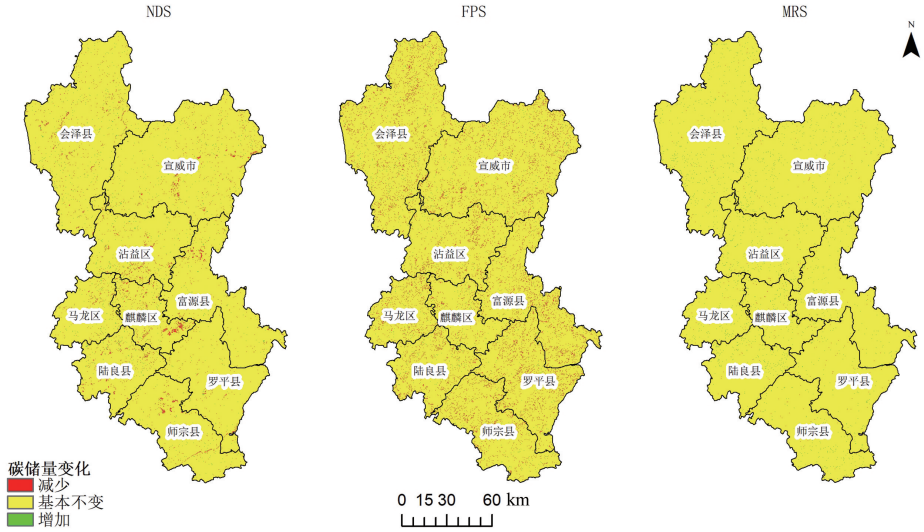


图 6 曲靖市 2020—2030 年多情景下碳储量变化空间分布

散分布，主要分布于会泽县、宣威市。在自然发展情景下，建设用地急剧扩张，生态用地被大量占用，致使碳储量下降 0.41%。在耕地保护情景下，碳储量降幅最大，达到 0.44%；碳储量减少区域呈块状集中分布于麒麟区、宣威市、沾益区、会泽县和陆良县，呈点状分布于宣威市、会泽县、罗平县、富源县。

3.4 不同发展情景下景观格局演变与分析

从未来的时间序列看，景观破碎度综合指数的变化表现出与碳储量变化的正相关关系，3 种情景指数由大到小依次为 MRS>NDS>FPS（表 6）。在 4 项指数中，蔓延度指数与香农多样性指数呈上升趋势，分离度指数呈下降趋势，表明曲靖市的景观破碎度降低，斑块间连通度增强，景观异质性增强。而斑块密度在自然发展情景与耕地保护情景下呈上升趋势，仅在石漠化治理情景下呈下降趋势。

表 6 曲靖市 2030 年多情景下土地利用对景观破碎度的影响

不同情景	斑块密度	蔓延度指数	分离度指数	香农多样性指数	景观破碎度综合指数
NDS	0.537	61.698	0.921	1.361	0.457
FPS	1.004	61.410	0.921	1.355	0.385
MRS	0.336	62.250	0.920	1.349	0.490

从县域尺度看（图 7），2030 年 3 种情景下景观破碎度对土地利用变化的响应不同。在自然发

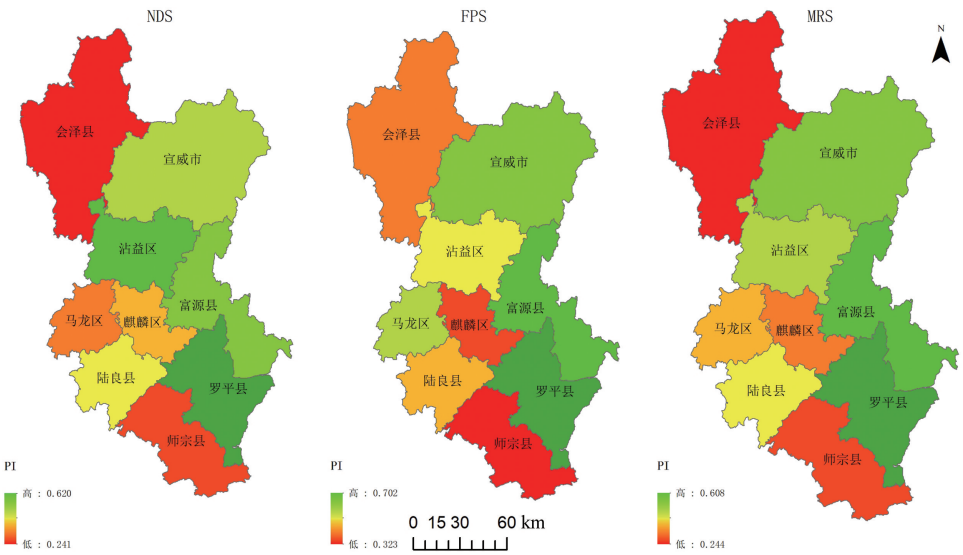


图 7 曲靖市 2030 年多情景下县域景观破碎度

展情景下，罗平县的景观破碎度最高，综合指数为 0.620；师宗县、会泽县景观破碎度最低，综合指数分别为 0.263、0.241。在耕地保护情景下，罗平县的景观破碎度最高，综合指数为 0.702；麒麟区、师宗县景观破碎度最低，综合指数分别为 0.334、0.323。在石漠化保护情景下，罗平县的景观破碎度最高，综合指数为 0.608；师宗县、会泽县景观破碎度最低，综合指数分别为 0.247、0.244。

4　讨论

对比 3 种情景下的碳储量变化，耕地保护情景的碳储量流失量最大。彭双云等[13]也认为耕地利用为导向的情景碳储量下降显著，说明耕地保护对碳储量水平存在负面影响。另外，耕地保护情景下的景观破碎度最低，但建设用地面积缩减严重，不利于社会经济发展。对此，应更加谨慎地进行土地利用规划，合理控制耕地扩张，在保障耕地安全与经济发展的同时，提高区域碳储量水平并降低区域景观破碎度。

石漠化治理情景下林地面积大幅增加提高了区域碳储能力。张靖宙等[11]的研究也表明石漠化治理可以提升区域碳储量，说明石漠化治理水平与碳储量水平呈正相关关系。对此，未来可通过天然林地生态修复与人工造林等方式提高林地覆盖率，优先连通高碳汇林地、草地斑块，形成连续生态廊道，加强区域的石漠化治理，从而增强碳储能力降低景观脆弱性。

景观破碎度与碳储量存在显著的正相关关系。因此，在进行土地利用规划时，应优先考虑保护大面积的连续的高碳密度的生态系统，如林地、草地等。同时，避免高碳储量区域的分裂，以降低景观破碎度，保持生态系统的连续性和完整性。

由于数据来源与研究方法的限制，县域景观单元的景观破碎度数据量不足，难以支撑其与碳储量进行更为科学的空间相关性分析，文中只能通过观测数据的变化探究两者关系。今后应结合更加详细的行政区划数据（乡镇行政区划、街道行政区划），划分更为详细的景观单元探究两者关系。基于 InVEST 与 PIUS 模型的碳储量估算为静态评估，忽略了碳密度数据的动态变化以及相关政策的影响，今后应结合更多实测数据与政策因素来估算碳储量，以提高估算的准确性。

5　结论

2000—2020 年曲靖市碳储量整体呈现下降趋势，空间分布呈东北高西南低的特征。土地利用类型以耕地、林地和草地为主，土地转移主要发生于三者间。草地流失与建设用地扩张是曲靖市碳储量流失的核心原因。

石漠化治理有利于提高区域碳储能力，耕地保护情景最有益于降低景观破碎度。未来应通过石漠化高风险区的识别检测，进行差异化县域管理，应对碳汇关键区和高潜力区重点保护与修复，优化碳汇低值区结构，提升其生态功能。同时，耕地保护必须与生态用地保护和建设用地刚性约束协同推进，避免因保护耕地导致生态用地被无序侵占，引起碳储量流失。

相较于 2020 年，3 种情景下景观破碎度均有所缓解。从历史与未来时间序列的演变来看，喀斯特地区的景观破碎度与碳储量存在显著的正相关关系，表明景观格局完整性对维持区域碳储存能力存在关键作用。因此，在国土空间规划中应优先界定并保护高碳汇生态核心区，通过廊道连通孤立生态斑块，提升景观整体性与碳汇韧性。

参考文献

[1]张中祥.碳达峰、碳中和目标下的中国与世界:绿色低碳转型、绿色金融、碳市场与碳边境调节机制[J].人民论坛·学术前沿,2021(14):69-79.

[2]于贵瑞,朱剑兴,徐丽,等.中国生态系统碳汇功能提升的技术途径:基于自然解决方案[J].中国科学院院刊,2022,37(4):490-501.

[3]雷馨,海新权.祁连山地区土地利用变化对碳储量的影响及经济价值估算[J].干旱区研究,2023,40(11):1845-1854.

[4]ZHAO L,LIU J P,TIAN X Z.The temporal and spatial variation of the value of ecosystem services of the Naoli River Basin ecosystem during the last 60 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10):3169-3176.

[5]ZHANG P,LIU Y H,PAN Y,et al.Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control [J]. Mathematical and Computer Modelling,2013,58(3/4):588-595.

[6]曾伟生.东北落叶松林碳储量生长模型研建及固碳能力分析[J].林业资源管理,2022(1):18-23.

[7]雒舒琪,胡晓萌,孙媛,等.耦合 PLUS-InVEST 模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(2):300-314.
[8]ZHAO M M, HE Z B, DU J, et al. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models[J]. Ecological Indicators, 2019, 98: 29-38.
[9]姚龙杰,岳邦瑞,潘卫涛,等.县域碳储量时空演变与多情景模拟:基于 FLUS 和 InVEST 模型[J].中国城市林业,2023,21(5):152-158.
[10]LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85:101569.
[11]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):72-81.
[12]张凯琪,陈建军,侯建坤,等.耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J].中国环境科学,2022,42(6):2799-2809.
[13]彭双云,陈明潇,张老伟,等.滇中城市群碳储量时空演变及其对 LULC 变化的响应[J].水土保持学报,2024,38(4):246-256,266.
[14]李倩,王成军,冯涛,等.基于 SD-PLUS 耦合模型的陕西省土地利用变化及碳储量多情景预测[J].水土保持学报,2024,38(3):195-206,215.
[15]孙方虎,方凤满,洪炜林,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J].水土保持学报,2023,37(1):151-158.
[16]丁岳,王柳柱,桂峰,等.基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量[J].环境科学,2023,44(6):3343-3352.
[17]唐娇华,李智琦,潘勇军.广州市土地利用变化与碳储量模拟:基于 PLUS-InVEST 模型分析[J].中国城市林业,2024,22(4):61-68.
[18]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.
[19]于小博,周宇欣,蒲一帆,等.黑龙江省绥棱县多情景景观格局变化特征及碳储量时空演变分析[J].北方园艺,2024(2):68-78.
[20]曾庆雨,孙才志.黄河流域陆地生态系统碳储量测算及其影响因素[J].生态学报,2024,44(13):5476-5493.
[21]ZOU L L, WANG J Y, BAI M D. Assessing spatial-temporal heterogeneity of China's landscape fragmentation in 1980 - 2020[J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108654.
[22]吴小飘.典型喀斯特脆弱山区景观破碎化对碳储量的影响研究[D].贵阳:贵州师范大学,2024.
[23]徐森,李思亮,钟君.西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响[J].环境科学,2022,43(2):752-761.
[24]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.
[25]李阳兵,白晓永,邱兴春,等.喀斯特石漠化与土地利用相关性研究[J].资源科学,2006,28(2):67-73.

(上接第 107 页)

[13]孙洋洋,沈泽琦,黄乐妍,等.不同城市绿地类型碳源/汇的城乡梯度格局:以杭州市为例[J].生态学报,2024,44(3):930-943.
[14]TEWS J, BROSE U, GRIMM V, et al. Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures[J]. Journal of Biogeography, 2004, 31(1): 79-92.
[15]裴宏泽,赵亚超,张廷龙.2000—2020 年黄土高原 NEP 时空格局与驱动力[J].干旱区研究,2023,40(11):1833-1844.
[16]WU J G, SHEN W J, SUN W Z, et al. Empirical patterns of the effects of changing scale on landscape metrics[J]. Landscape Ecology, 2002, 17(8): 761-782.
[17]CHUAI X W, QI X X, ZHANG X Y, et al. Land degradation monitoring using terrestrial ecosystem carbon sinks/sources and their response to climate change in China[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(10): 3489-3502.
[18]YU G R, ZHENG Z M, WANG Q F, et al. Spatiotemporal pattern of soil respiration of terrestrial ecosystems in China: the development of a geostatistical model and its simulation[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(16): 6074 - 6080.
[19]REN Y, WEI X H, WANG D R, et al. Linking landscape patterns with ecological functions: a case study examining the interaction between landscape heterogeneity and carbon stock of urban forests in Xiamen, China[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 293: 122-131.
[20]杨杰,李志刚.长江经济带城市生态福利绩效评价及空间变异性特征分析[J].长江流域资源与环境,2024,33(12):2551-2561.
[21]王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:165-168.
[22]WU J G. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations[J]. Landscape ecology, 2004, 19: 125-138.
[23]BRUDVIG L A, DAMSCHEN E I, HADDAD N M, et al. The influence of habitat fragmentation on multiple plant-animal interactions and plant reproduction[J]. Ecology, 2015, 96(10): 2669-2678.
[24]陈小平,陈文波.鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J].应用生态学报,2016,27(5):1611-1618.