生态系统碳储量的多情景模拟与时空变化

——以渝东南为例

刘 新[1] 黄豪璐[2]

1 重庆境壹德景观设计工程有限公司 重庆 400000
2 招商局重庆交通科研设计院有限公司 重庆 400067

摘要：气候变化对人类构成了巨大的威胁，掌握生态系统碳储量的时空变化有助于制定更合理的政策和策略来应对这一问题。文章以渝东南区域为例，应用 PLUS 及 InVEST 模型对土地利用及生态系统碳储量进行多情景模拟及评估，并在此基础之上通过最邻近指数、核密度及标准差椭圆对减少区域的空间特征进行分析。结果表明：1）2002—2022 年，土地利用类型的转换主要是灌木转换为林地和耕地。在 2032 年的不同模拟情景下，耕地和建设用地均具有增长的趋势，主要增长来自于林地，其余用地变化的幅度较小。2）2002—2022 年碳储量总量在逐渐减少，预计在 2032 年碳储量仍然是减少的趋势，且碳储量减少的幅度依次为 EPS<NDS<UDS<CPS。3）最邻近指数具有较大可能减小，未来的碳储量减少区域具有更加聚集的趋势；通过核密度分析发现，碳储量的减少区域主要分布在酉阳、武隆、石柱等城市中心周边区域；通过标准差椭圆发现，碳储量减少区域具有向东北和东南偏移的趋势，且其方向性不断变强。最后，根据研究结果提出了保护生态、谨慎发展农业等建议。

关键词：生态系统碳储量；土地利用；多情景；时空变化
DOI：10.12169/zgcsly.2024.11.01.0003

Multi-scenario Simulation and Spatiotemporal Variation of Ecosystem Carbon Storage: A Case Study of Southeast Chongqing

Liu Xin[1] Huang Haolu[2]

(1. Chongqing Realm One Landscape Design Studio, Chongqing 400000, China; 2. Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd., China Merchants Chongqing 400067, China)

Abstract: Climate change poses a great threat to human beings, and understanding the spatiotemporal variations of ecosystem carbon storage can help formulate more reasonable policies and strategies to address this issue. This paper takes southeast Chongqing as an example to apply PLUS and InVEST models to simulate and evaluate its land use and ecosystem carbon storage in multiple scenarios, and then analyze the regional spatial characteristics of the storage decreased through the nearest neighbor index, kernel density and standard deviation ellipse. The results show: 1) Between 2002 and 2022, the conversion of land use is concentrated in the conversion of shrubs to forests and croplands. Under different simulated scenarios in 2032, both cropland and construction land present an increasing trend, converted mainly from forestland, while the land uses remain smaller changes; 2) The total carbon storage amount is gradually decreasing from 2002 to 2022. It is expected that the carbon storage will be still in a decreasing trend towards 2032, and the magnitude of carbon storage reduction is ordered as EPS<NDS<UDS<CPS; and

收稿日期：2024-11-01
* 基金项目：校企联合研究课题“双碳”目标下推进河南省体育产业高质量发展的路径研究（SKL-2023-2342）
第一作者：刘新（1987- ），男，硕士，高级工程师，研究方向为景观规划与设计。E-mail：xinliu. jason@ gmail. com
通信作者：黄豪璐（1990- ），女，硕士，工程师，研究方向为景观规划与设计。E-mail：278140841@ qq. com

3) The nearest-neighbour index has a greater possibility of decreasing, and the future carbon storage reduction areas have a tendency to become more aggregated; through the kernel density analysis, it is found that the carbon stock reduction areas are mainly distributed around the urban centers of Youyang, Wulong and Shizhu cities; through the standard deviation ellipse, it is found that the carbon storage reduction areas have a tendency to shift towards the northeast and southeast, and their directionality is becoming stronger and stronger. Eventually, based on the research results, suggestions such as ecological protection and prudent development of agriculture are put forward.

Keywords: ecosystem carbon storage; land use; multi-scenario; spatiotemporal variation

极速的工业化和城市化引起了城市土地格局的剧烈变化，造成陆地生态系统的结构和功能失衡，进而影响碳循环的平衡，造成一系列的气候问题。这一议题引起了多个机构及国家的重视，如联合国可持续发展目标（SDGs）强调保护和恢复森林碳汇、推广新能源、减少碳排放等一系列倡议，中国政府提出在 2030 年前实现“碳达峰”，力争 2060 年前实现“碳中和”的雄伟目标。在此背景下，生态系统中的碳储量作为全球碳循环和气候调节的重要组成部分被城市规划、土地管理、景观生态等多个学科所关注。

碳储量评估是进行控制、优化和管理碳储量的前提与基础。碳储量的评估有多种方法如遥感估计方法、IPCC 清单方法、模型评估法等[1-6]，其中 InVEST 模型由于其准确程度高、操作便捷、付出成本低的特点被广泛应用在区域或城市这种大尺度或中观尺度的研究中，如向书江等[7]对重庆市城区 2000—2020 年生态系统碳储量时空变化的研究，Cai 等[8]评估了长三角地区 1990—2015 年生态系统碳储量时空变化。除此之外，研究发现生态系统碳储量的空间变化主要是由土地结构变化所引起[9-10]。基于此原理，研究者逐渐将土地的模拟预测与碳储量评估相结合进行了一系列研究，期望探索未来碳储量的变化趋势，进而提出具有针对性的碳储量变化预案。

既有研究中，研究者首先通过 PLUS、FLUS、MCCA、CA-Markov 等模型对土地进行多情景或单情景预测，然后结合 InVEST 模型对未来生态系统碳储量进行评估模拟，判断其在数量、位置等方面的时空变化特征，进而制定未来土地和城市发展的策略[11]。目前，土地预测-生态系统碳储量评估这一范式已经被学者广泛接受并被应用在多个城市碳储量模拟案例中，如广东[12]，桂林[13]，武汉[14]等。然而，研究者多将生态系统碳储量时空变化的重点集中在数量的变化上，对于碳储量空间的变化仅局限在变化区域的简单描述上，实际上碳储量在时空变化中包含密度、聚类方式、偏移方向等一系列信息，单一的评估方式严重阻碍了碳储量发展方案的制定与实施[15]。

综上所述，为了更加全面地衡量生态系统碳储量时空变化特征，本研究以渝东南区域为研究对象，通过 PLUS 模型模拟区域土地的多情景变化并进行碳储量评估，同时选择最邻近指数、核密度及标准差椭圆等具有代表性的指标对碳储量时空变化进行全面评估，为后续的可持续发展提供理论支撑。

1 研究区概况

研究区域为重庆市的东南区域（107°14′，28°10′，108°34′，30°33′），简称“渝东南”，包含黔江区、武隆区、石柱土家族自治县、秀山土家族苗族自治县、酉阳土家族苗族自治县、彭水苗族土家族自治县六区县，面积约为 1.98 万 km^2，海拔在 103~2 020 m，是重庆市重要的少数民族聚集区，同时也是重庆市生态保护发展区、国家重点生态功能区与重要生物多样性保护区[16]。

2012—2022 年，渝东南城市化率由 33.36% 增长至 51.68%，城市化率的快速攀升带来了资源的过度开采和城市建设开发边界的无序蔓延，对生态环境及碳循环造成了严重的影响。因此，如何合理地管理生态系统碳储量，是该区域未来发展面临的重要议题。

2 研究方法

本研究主要分为 3 个步骤：1）利用 2012、2022 年历史土地数据，结合 PLUS 模型和驱动力

因子对 2032 年的自然发展情景（NDS）、城市发展情景（UDS）、耕地保护情景（CPS）和生态保护情景（EPS）下的土地利用进行模拟，分析土地利用的转化规律；2）通过 InVEST 模型评估 2002、2012、2022 及 2032 年的生态系统碳储量，分析其数量的变化；3）选择核密度、最邻近指数及标准差椭圆对生态系统碳储量变化点进行分析，确定其时空变化特征。

2.1　数据来源及处理

为了更加准确地对碳储量进行评估及模拟，本研究参考 PLUS 模型开发者梁讯团队的研究方法，选择尽可能接近评估及预测基准的数据进行研究[17]。选择 10 种用于碳储量计算及预测的典型数据：选择 2002、2012 及 2022 年 3 期土地利用数据作为碳储量计算及预测的基础；通过 ArcMap 的 Surface 及栅格计算器处理 DEM 数据，获取高程、坡度及地形起伏度因子；温度、降雨、夜间灯光、人口及 GDP 数据经过重新采样，将其统一为 30 m 精度；LANDSAT8 数据通过栅格计算器获得 NDVI 数据；路网、水系、街道及城市中心通过欧式距离计算，获得其 30 m 精度的距离数据（表 1）。

表 1　数据来源

数据名称	数据类型	精度	时间/年	数据来源
土地利用	栅格	30 m	2002、2012、2022	https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021
DEM	栅格	30 m	2019	http://www.gscloud.cn/
温度	栅格	1 km	2022	https://doi.org/10.5281/zenodo.318572
降雨	栅格	1 km	2022	https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpdc.270961
夜间灯光	栅格	1 km	2022	https://eogdata.mines.edu/products/vnl
人口	栅格	1 km	2022	https://www.worldpop.org
LANDSAT8	栅格	30 m	2022	http://www.gscloud.cn/
GDP	栅格	1 km	2022	https://www.resdc.cn
路网	shp	-	2023	https://www.openstreetmap.org/
街道及城市中心	shp	-	2023	https://api.map.baidu.com/
水系	shp	-	2022	https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021
自然保护区	shp	-	2018	https://www.resdc.cn

2.2　土地利用模拟

2.2.1　PLUS 模型

PLUS 模型包含两个主要模块：1）土地扩张分析策略（LEAS）模型。LEAS 模块中输入两期土地利用数据及驱动力因子数据，利用随机森林算法计算驱动力对各类土地扩张的影响，确定不同土地类型的发展潜力。2）基于多类型随机种子（CARS）的 CA 模型。CARS 模块是 CA 模型，它是基于 LEAS 的分析结果，模拟局部土地利用的竞争，进而进行土地分配。

模型的有效性是模拟的前提与基础。研究选择广泛应用的单期检测方法[17-18]，以 2012 年的历史土地利用数据为基础，选用 12 个土地驱动力因子（图 1），基于 PLUS 模型的 LEAS 模块获得了不同土地类型的发展潜力。随后，以 2012 年的土地利用和发展潜力数据为基础，通过 CARS 模型模拟 2022 土地利用。最后，通过 2022 模拟的土地利用数据和实际 2022 土地利用进行验证，发现模型的 Kappa 系数为 0.83，总体精度为 89.85%，表明模型可以较好模拟研究区域的土地变化，为 2032 年研究区不同情景土地预测提供了基础。

2.2.2　多情景设置

为了全面考虑研究区未来土地利用变化的情况，将研究区 2032 年的土地发展情况设置为 NDS、UDS、CPS 和 EPS4 类[19-20]。研究以水体和自然保护区为限制区域，以 NDS 情景为基础，通过调整其转移概率，获取其他 3 类情景下的土地发展情况。具体设置如下：

1）NDS：在 NDS 发展情况下，土地按照 2012—2022 年的发展趋势进行增长，不受其他政策的影响。基于 2012—2022 的土地转移情况，通过 PLUS 模型中的 Markov 模块预测 2032 年自然增长情况下的不同土地利用类型数量情况。

2）UDS：对 NDS 情景下的 Markov 的转移矩阵概率进行修正，将林地、耕地、草地、灌木转移到建设用地的概率提高 20%。

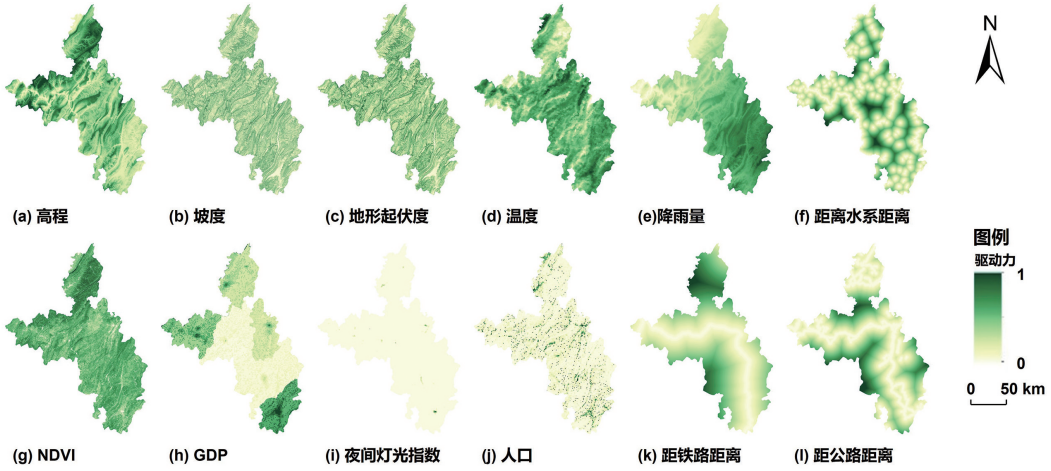


图 1 土地驱动力因子

3）CPS：对 NDS 情景下的 Markov 的转移矩阵概率进行修正，将耕地转向建设用地的概率降低 60%，转向其他用地概率降低 10%；建设用地转向耕地的概率提高 50%。

4）EPS：对 NDS 情景下的 Markov 的转移矩阵概率进行修正，将林地、灌木转向建设用地的概率降低 30%，耕地、草地转向建设用地的概率降低 20%，建设用地转向其他用地的概率增加 10%。

2.3 碳储量评估

InVEST 模型作为碳储量评估模型，被广泛应用在宏观、中观尺度的碳储量的评估中。该模型考虑了地上、地下、土壤和死亡 4 个碳储量组成部分[21]。具体的计算公式如下：

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

式（1）中：C_{total} 为生态系统总碳储量；C_{above}、C_{below}、C_{soil}、C_{dead} 分别为地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和死亡碳储量。InVEST 模型计算需要以上不同部分的碳密度，研究将地理位置一致、尺度相近的万其林等[22]研究中的碳密度作为本研究的重要参考，在此基础上获得本研究相关的碳密度（表 2）。

表 2 不同土地覆盖类型碳库碳密度 $t \cdot hm^{-2}$

用地类型	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}	C_{total}
耕地	3.45	0.68	41.02	0.35	45.50
林地	32.85	6.97	105.81	3.28	148.91
灌木	8.67	4.05	82.90	0.87	96.49
草地	2.47	4.06	70.25	0.25	77.03
水体	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

2.4 碳储量变化区域时空变化评估

2.4.1 最邻近指数

最邻近指数是用于衡量点要素在地理空间中相互邻近程度的指标，本研究选择最邻近指标衡量生态系统碳储量减少区域的聚集特征[23]，计算公式如下：

$$NNI = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i \times 2\sqrt{\frac{n}{A}} \quad (2)$$

式（2）中：d_i 是 i 个点到其最邻近的距离；n 是总点数；A 是研究区面积。当 $NNI=1$ 表示点是随机分布的；$NNI<1$ 表示点是聚集分布；$NNI>1$ 表示点是均匀分布。

2.4.2 核密度

核密度作为一种常用的地理分析方法，被广泛用于评估事物在空间上的分布密度[24]。本研究使用核密度分析生态系统碳储量减少区域在空间上的密度特征，计算公式如下：

$$f(x, y) = \frac{1}{h^2}\sum_{i=1}^{n} K\left(\frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{h}\right) \quad (3)$$

式（3）中：$f(x, y)$ 是位置在 (x, y) 处的核密度估值；n 是样本点数量；h 是搜索半径；x_i 与 y_i 为第 i 个样本点；K 为高斯函数。

2.4.3 标准差椭圆

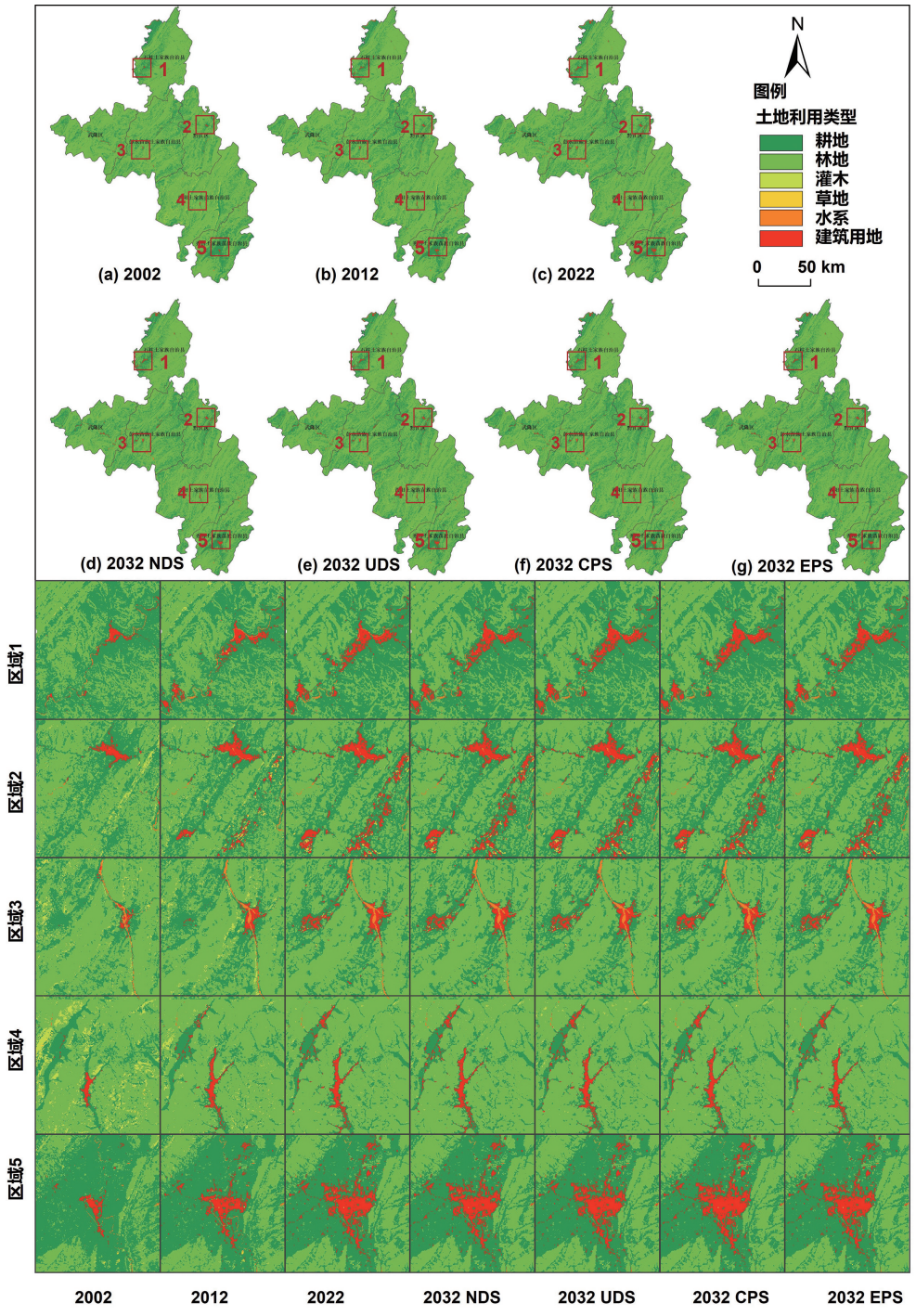
标准差椭圆作为一种有效的空间分析方法，能够有效描述地理要素的整体分布特征。本研究采用 SDE 对生态系统碳储量减少区域进行分析，以此观察整体分布特征。其中 SDE 中心为碳储量

减少区域的重心，转角表示其分布方向，扁率表示方向性程度[25]。

3　结果与分析

3.1　2002—2032 土地利用及模拟

图 2 所示为 2002—2022 年及 2032 年不同发展情景模拟的土地利用类型。土地变化的集中区域主要发生在研究区的城市中心区域，主要表现为建设用地以城市中心为核心向外扩张（图 2 中区域 1~5）。如图 3a 所示：研究区内的林地面积最大，占比在 70% 以上；其次为耕地面积，占比在 20% 以上，二者占比之和超过了 90%。在 2002—2022 年，土地利用类型的转换主要是灌木转换为其他用地，灌木共减少 553.05 km^2，共减



注：图中 1~5 分别代表石柱、黔江、彭水、酉阳及秀山城市中心区域。

图 2　2002—2032 年土地利用类型

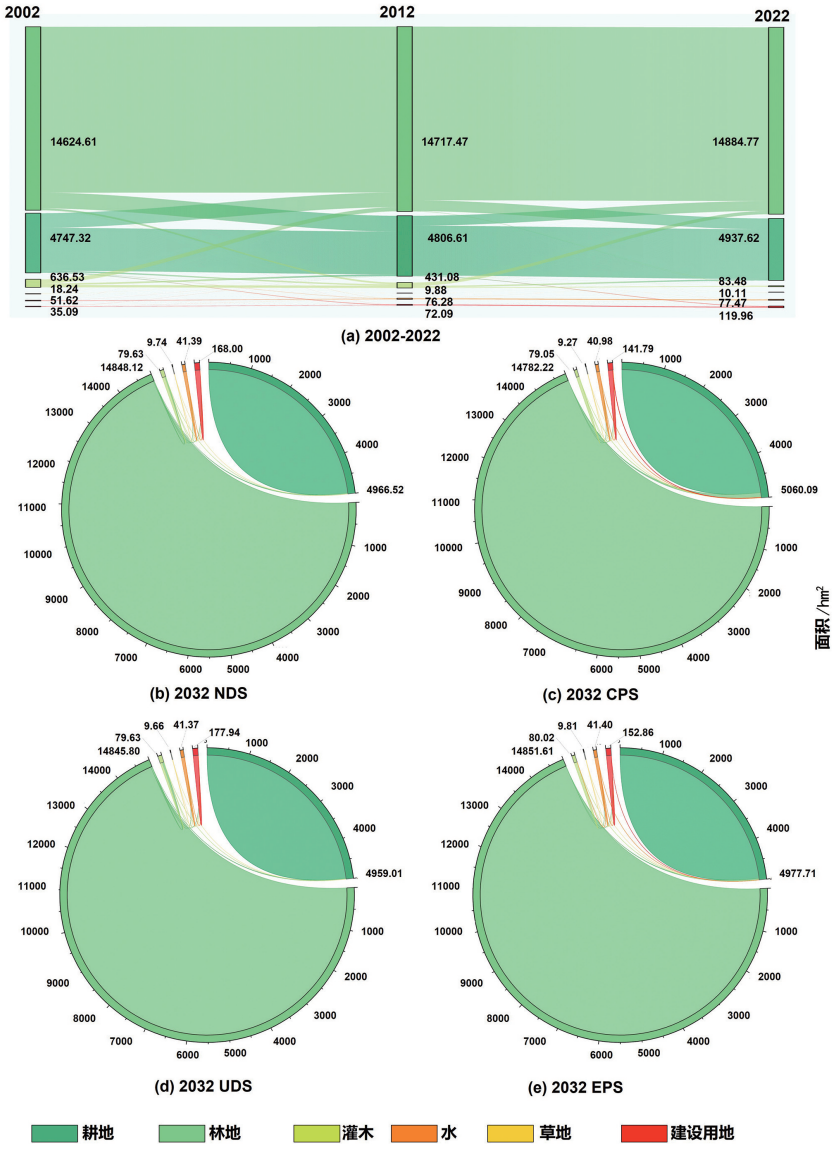


图 3 2002—2032 年土地转换

少了 86.89%，主要转换为林地和耕地；林地和耕地也有大量的互相转换，但是在总体数量上基本持平；建设用地快速增长了 241.86%，是所有用地中增长幅度最大的。这可能与城市在过去 20 年中人口及 GDP 增长有较大关系，城市人口的增长促使建设用地的扩张。

未来如无政策影响，在 NDS 情景下（图 3b），耕地和建设用地具有增长的趋势，主要增长来自于林地，表明未来该区域是以城市建设和农业发展为主导，但在不同的政策干预下，耕地和建设用地的增长不同。研究发现，土地的增长严格受土地类型规模的影响。其中，由于耕地基础规模较大，在 CPS 情景下（图 3c），林地将呈现最大幅度的减少，耕地将有大幅度的增长，而建设用地以最小幅度增长。在 UDS 情景下（图 3d），尽管相较于 NDS，建设用地具有增长趋势，然而受限于基础规模，仅比同期的 NDS 多增长 9.94 km^2。在 EPS 情景下（图 3e），建设用地和耕地的扩张受到限制，林地的减少幅度最小，比 NDS 情景下少减少 3.49 km^2。

3.2 2002—2032 生态系统碳储量评估

如图 4 所示，碳储量的分布与土地的分布具有相关性，沿着城市中心向外碳储量变高。在数量方面，2002—2022 年碳储量的总量在逐渐减少，2002—2012 年减少 39.41 万 t，2012—2022 年减少 26.49 万 t（表 3）。

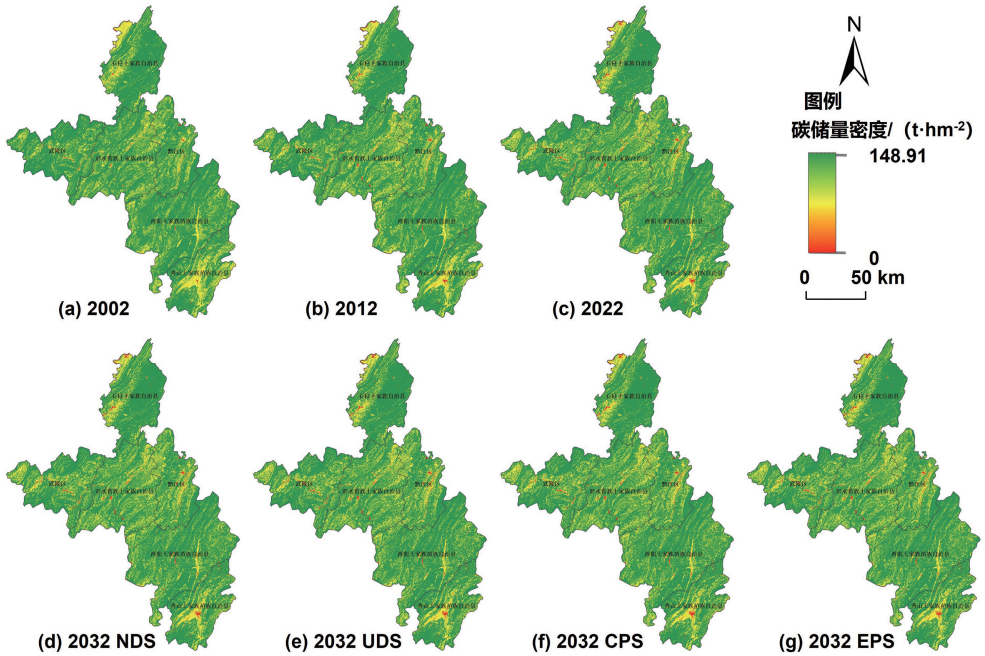


图 4　2002—2032 年碳储量分布

表 3　碳储量变化（2002—2032 年）　　万 t

用地类型	2002 年	2012 年	2022 年	2032 年 NDS	2032 年 UDS	2032 年 CPS	2032 年 EPS
耕地	2 160. 03	2 187. 01	2 246. 62	2 259. 77	2 256. 35	2 302. 34	2 264. 86
林地	21 777. 50	21 915. 79	22 164. 91	22 110. 35	22 106. 89	22 012. 20	22 115. 54
灌木	614. 19	415. 95	80. 55	39. 94	39. 92	39. 54	39. 95
草地	14. 05	7. 61	7. 79	7. 50	7. 44	7. 14	7. 55
水体	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00
建设用地	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00
合计	24 565. 77	24 526. 36	24 499. 87	24 417. 56	24 410. 60	24 361. 22	24 427. 90

2022—2032 年，碳储量仍然是减少的趋势（表 3）。根据土地发展趋势，碳储量的减少主要是由于建设用地及耕地扩张、林地减少所导致。其中，在没有政策干预的 NDS 情景下，碳储量将减少 82. 31 万 t；在农业发展为主导的 CPS 情景下，碳储量将呈现最大幅度的减少，减少量将达到 138. 65 万 t；在城市建设主导的 UDS 情景下，碳储量将减少 89. 27 万 t；在 EPS 情景下，碳储量呈现最小幅度的减少，为 71. 97 万 t。显然，2022—2032 年，无论是在任何情景下，碳储量幅度将呈现减少趋势，且相较于 2012—2022 年，减少幅度将进一步增大，这可能与耕地面积和建设用地的基础规模有相关性，两种土地类型在 2022 年达到了过去 20 年的顶峰，继续扩张将导致碳储量大幅减少。

3. 3　2002—2032 年碳储量变化区域时空变化特征

3. 3. 1　最邻近指数

如表 4 所示，不同时期、不同情景下的最邻近指数均小于 1，表明碳储量的减少区域具有聚集特征。其中，在 2002—2022 年聚集程度几乎相同，其最邻近指数均在 0. 80 左右。在未来发展中，聚集程度可能加剧，在 2032 年的 4 种情景下，仅有 EPS 这一情景最邻近指数变大，其他情景下的这一指数在不断变小。减少区域聚集的特征反映了研究区域的建设、开发并非随机，而是具有一定规律的，即开发的区域较为集中且随着时间推移这一趋势可能加剧。

表 4　碳储量减少区域最临近指数

时期	NII
2002—2012 年	0. 81
2012—2022 年	0. 80
2022—2032 年 NDS	0. 70
2022—2032 年 UDS	0. 70
2022—2032 年 CPS	0. 75
2022—2032 年 EPS	0. 82

3. 3. 2　核密度

如图 5 所示，2002—2012 年，碳储量减少区域

的热点主要分布在彭水和黔江，位于研究区中部。随着时间的发展，2012—2022 年变化的高密度区域向南北两端扩散，高密度区域分布在武隆、石柱、彭水及酉阳等区县。在 2032 年不同情景下，NDS 及 UDS 的减少热点分布较为相似，主要分布在酉阳；CPS 情景下变化的热点区域分布较为广泛，在武隆、黔江、酉阳、秀水等地均有分布；在 EPS 情景下，受制于严格的开发控制，其变化热点区域未形成大面积的连片，仅在酉阳、彭水等地零星的分散。以上说明这些碳储量减少的区域与人类的干扰直接相关，应对这些变化的热点区域进行重点监控，减少不必要的碳储量损失。

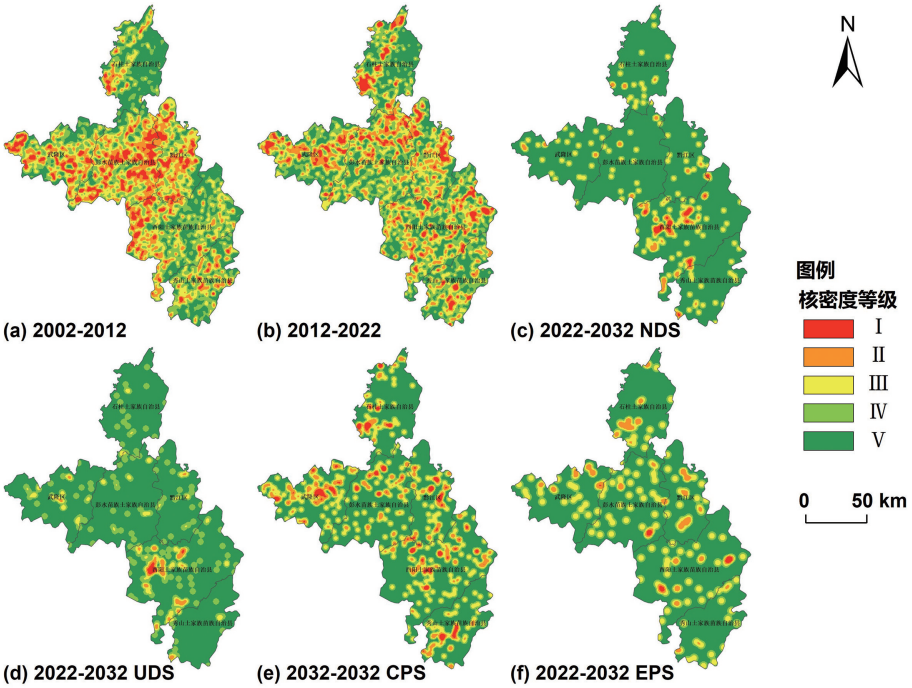


图 5 碳储量减少区域核密度

3.3.3 标准差椭圆

如表 5 所示，生态系统碳储量减少区域的 SDE 转角在 144.96～151.87°，呈现西北-东南的分布格局。生态系统碳储量减少区域的 SDE 中心在 2012—2022 年与 2002—2012 年总体差距不大，轻微地向西北方向移动。在 2032 年的 NDS 及 UDS 情景下，生态系统碳储量减少区域的 SDE 中心将向东南偏移；在 EPS 及 CPS 情景下，碳储量减少区域的 SDE 中心向东北方向偏移。在 SDE 扁率方面，生态系统碳储量变化点的扁率具有变大的趋势，其中 2012—2022 的 SDE 扁率比 2002—2012 的扁率高 0.3。在 2032 年的不同情景下扁率均有所增减，增加幅度为 0.01～0.05，表明方向性越来越强，这可能与变化的集中趋势有关。

表 5 标准差椭圆相关指数

时期	SDE 中心经、纬度	SDE 转角/°	SDE 扁率
2002—2012 年	108.42° E，29.23° N	146.02	0.39
2012—2022 年	108.45° E，29.26° N	148.15	0.42
2022—2032 年 NDS	108.51° E，29.08° N	151.29	0.47
2022—2032 年 UDS	108.49° E，29.12° N	151.87	0.44
2022—2032 年 CPS	108.42° E，29.27° N	144.96	0.43
2022—2032 年 EPS	108.43° E，29.27° N	148.14	0.45

4 讨论

在碳储量的数量方面，研究区的生态系统碳储量在 2002—2022 年呈下降趋势，未来预计将继续减少，这对实现碳中和目标构成了重大挑战。该结果与以往的相关研究在总体发展趋势上是相

似的，如相关学者对于合肥市[26]、呼和浩特市[27]及南京市[28]等案例城市的研究中，其总体的碳储量呈现下降的发展趋势，且最终结果显示在 EPS 和 CPS 情景下碳储量减少幅度较小，本研究中 EPS 情景下的研究结果与上述研究相似。然而，本研究中在 CPS 情景下碳储量减少最多，与上述研究存在较大差异。生态系统碳储量严格受土地结构的影响[29-30]，不同以往研究中耕地和建设用地面积占比较大，本次研究中的林地和耕地面积占比较多（林地占比 70%以上，耕地占比 20%以上），二者的发展对碳储量变化有着绝对性影响。在 CPS 情景下，较大规模的耕地面积增长，大幅度地侵占林地，进而导致碳储量极速降低。因此，不同于其他城市以落实耕地和生态保护发展模式为主，本研究中不仅需要重视优先生态保护，也需要谨慎对待农业的发展。EPS 情景下，建议严格保护生态保护红线，避免过度的林业开发及其他破坏性活动，以维持和提升生态系统的碳储存能力；CPS 情景下，在确保粮食安全的同时，可考虑将部分低效土地转化为具有高经济价值和高碳强度的果园和经济林，这不仅能提高土地的经济效益，还能增加碳储量。

在碳储量变化区域时空间特征方面，本研究发现在未来发展的过程中，除了 EPS 情景下，最邻近指数均在减少，这表明未来的变化区域具有很大的概率更加集中。通过核密度分析发现，这些变化的区域极有可能发生在酉阳、武隆和石柱等城市中心周边区域，这些区域是未来碳储量损失的重点区域，需要在未来制定土地政策时重点关注，在保障发展的前提下，尽可能减少碳储量损失。

在碳储量的时空发展中，变化区域最需要进行研究、监测，这些区域往往决定了碳储量未来发展的趋势。因此，本研究不仅关注传统研究中碳储量数量变化的分析，也重点对碳储量变化区域的时空变化进行剖析。研究通过最邻近指数分析了碳储量变化区域的聚集趋势，通过核密度指数分析了碳储量变化区域的热点，通过标准差椭圆分析了碳储量变化区域的位置偏移，提供了一个较为全面衡量碳储量变化区域时空分布特征的评估框架，为进一步挖掘碳储量时空变化提供了理论与技术支撑。

同时本研究也有不足之处，由于时间和财务限制，本研究使用的碳密度数据源自以往研究，尽管在案例筛选过程中，通过地理位置和尺度进行了严格限制，但缺乏实地测量可能仍会对研究结果造成一定的偏差，后续研究中，将针对这一问题进行核实及确定，以期使得研究更加准确、科学。

5　结论

2002—2022 年，灌木大量减少，林地、耕地及建设用地大幅增长。在未来的发展中，建设用地和耕地具有增加趋势且增长主要来源于林地。同时，受土地结构变化的影响，在 2000—2032 年，碳储量将呈现下降趋势，且在未来的发展情景中，其减小幅度依次为 EPS<NDS<UDS<CPS。在未来发展过程中，碳储量变化区域具有较大可能性更加集中，这些变化区域非常有可能发生在酉阳、武隆、石柱等城市中心周边，是未来发展需要关注的重点。

参考文献

[1]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.

[2]江佩宜,戴菲.城市绿地碳汇测算方法研究进展[J].中国城市林业,2024,22(1):87-93.

[3]HOUGHTON R A,SKOLE D L,LEFKOWITZ D S.Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985 II.Net release of CO_2 to the atmosphere[J].Forest Ecology and Management,1991,38(3/4):173-199.

[4]MISHRA U,TORN M S,MASANET E,et al.Improving regional soil carbon inventories: combining the IPCC carbon inventory method with regression Kriging[J].Geoderma,2012,189:288-295.

[5]SPEROW M.An enhanced method for using the IPCC approach to estimate soil organic carbon storage potential on U.S. agricultural soils[J].Agriculture,Ecosystems & Environment,2014,193:96-107.

[6]ZHUANG Q W,SHAO Z F,GONG J Y,et al.Modeling carbon storage in urban vegetation:progress,challenges,and opportunities[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2022,114:103058.

[7]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/覆被变化的响应及脆弱性分析[J].自然资源学报,2022,37(5):1198-1213.

[8]CAI W B,PENG W T.Exploring spatiotemporal variation of carbon storage driven by land use policy in the Yangtze River Delta Region[J].Land,2021,10(11):1120.

[9]WANG N F,CHEN X P,ZHANG Z L,et al.Spatiotemporal dynamics and driving factors of county-level carbon storage in the Loess Plateau:a case study in Qingcheng County,China[J].Ecological Indicators,2022,144:109460.

[10]ZHU G F,QIU D D,ZHANG Z X,et al.Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region,China[J].Ecological Indicators,2021,127:107770.

[11]HU J X,YAN D Y,WANG W L.Estimating carbon stock change caused by multi-scenario land-use structure in urban agglomeration[J].Sustainability,2023,15(6):5503.

[12]TIAN L,TAO Y,FU W X,et al.Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province,China[J].Remote Sensing,2022,14(10):2330.

[13]HE Y L,MA J M,ZHANG C S,et al.Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Guilin based on FLUS and InVEST models[J].Remote Sensing,2023,15(5):1445.

[14]WANG Z,ZENG J,CHEN W X.Impact of urban expansion on carbon storage under multi-scenario simulations in Wuhan,China[J].Environmental Science and Pollution Research International,2022,29(30):45507-45526.

[15]ZHANG C Y,ZHAO L,ZHANG H T,et al.Spatial-temporal characteristics of carbon emissions from land use change in Yellow River Delta region,China[J].Ecological Indicators,2022,136:108623.

[16]YE X,KUANG H H.Evaluation of ecological quality in southeast Chongqing based on modified remote sensing ecological index[J].Scientific Reports,2022,12(1):15694.

[17]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.

[18]程明月,姬广兴,黄珺嫦,等.基于 PLUS-InVEST 模型的陕西省多情景土地覆盖模拟与碳储量评估[J/OL].环境科学,2024:1-17[2024-12-30].https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202409068.

[19]GAN L,HALIK Ü,SHI L,et al.Multi-scenario dynamic prediction of ecological risk assessment in an arid area of Northwest China[J].Ecological Indicators,2023,154:110727.

[20]LIU Y C,JING Y D,HAN S M.Multi-scenario simulation of land use/land cover change and water yield evaluation coupled with the GMOP-PLUS-InVEST model:a case study of the nansi lake basin in China[J].Ecological Indicators,2023,155:110926.

[21]SHARP R,Chaplin-Kramer R,WOOD S A,et al.InVEST user's guide[M].The Natural Capital Project,Stanford University,University of Minnesota,The Nature Conservancy,and World Wildlife Fund,2018.

[22]万其林,邵景安.2000—2020 年三峡库区重庆段土地利用及碳储量估算[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2023,40(6):52-64.

[23]MAURO F,HAXTEMA Z,TEMESGEN H.Comparison of sampling methods for estimation of nearest-neighbor index values[J].Canadian Journal of Forest Research,2017,47(6):703-715.

[24]许泽宁,高晓路.基于电子地图兴趣点的城市建成区边界识别方法[J].地理学报,2016,71(6):928-939.

[25]WANG F H,CHEN C,XIU C L,et al.Location analysis of retail stores in Changchun,China:a street centrality perspective[J].Cities,2014,41:54-63.

[26]智菲,周振宏,赵铭,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的合肥市生态系统碳储量时空演变特征[J].水土保持学报,2024,38(2):205-215.

[27]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.

[28]孙欣欣,薛建辉,董丽娜.基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J].生态与农村环境学报,2023,39(1):41-51.

[29]张鹏,李良涛,苏玉姣,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的邯郸市碳储量空间分布特征研究[J].水土保持通报,2023,43(3):338-348.

[30]林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及预测:以广东省为例[J].中国环境科学,2022,42(10):4827-4839.