

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.02.017

曾清苹, 曾小英, 陈丽洁, 等. 重庆市碳储量对土地利用/覆被变化响应分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(2): 205-217.

# 重庆市碳储量对土地利用/覆被变化响应分析

曾清苹<sup>1,2</sup>, 曾小英<sup>1,2</sup>, 陈丽洁<sup>1,2</sup>, 李果<sup>1,2</sup>,  
童龙<sup>1,2,3</sup>, 谭丽<sup>1,2</sup>, 甘凤玲<sup>4</sup>, 师贺雄<sup>1,2</sup>,  
冉斌<sup>5</sup>, 刘萍<sup>6</sup>, 赵红敏<sup>1,2</sup>, 周飞<sup>7</sup>

- 重庆市林业科学研究院, 重庆 400036; 2. 三峡库区森林生态修复与利用重庆市重点实验室, 重庆 400036;
- 国家林业和草原局 国际竹藤中心, 北京 100102; 4. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331;
- 丰都县林木种苗管理站, 重庆 408200; 6. 秀山县林业局, 重庆 409900;
- 重庆市中林峰科技发展有限公司, 重庆 400036

**摘要:** 土地利用/覆被变化(LUCC)是影响区域生态系统碳储量变化的重要驱动因素。探讨碳储量对 LUCC 的响应关系, 对区域实现“双碳”战略目标具有重要意义。基于多期 LUCC 数据, 利用 InVEST 模型中的碳储量模块, 分析了重庆市土地利用类型转变和碳储量变化之间的关系, 并结合重心模型与冷热点聚类分析方法, 进一步揭示了重庆市碳储量的时空分布特征及其对土地利用类型变化的响应关系。1980—2020 年间, 重庆市土地利用类型演变剧烈, 大量耕地和草地向林地转移, 林地面积扩大为原来的 1.97 倍; 碳储量整体呈现先减少后增加的趋势, 其中 2000—2020 年间变化最为显著, 累计增加  $327.77 \times 10^6$  t; 在空间分布上, 碳储量重心经历了“东北—东南—西北”的迁移过程, 整体向东南方向偏移了 1 652.88 m; 碳储量“热点聚集区”主要分布在渝东北三峡库区和渝东南武陵山区, “冷点聚集区”则主要集中在重庆市主城区及其周边区域。

**关键词:** 土地利用; 碳储量; 重心分析; 聚类分析; 重庆市

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)02-0205-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## A Study on the Response of Carbon Storage to Land Use/Cover Change in Chongqing

ZENG Qingping<sup>1,2</sup>, ZENG Xiaoying<sup>1,2</sup>, CHEN Lijie<sup>1,2</sup>, LI Guo<sup>1,2</sup>,  
TONG Long<sup>1,2,3</sup>, TAN Li<sup>1,2</sup>, GAN Fengling<sup>4</sup>, SHI Hexiong<sup>1,2</sup>,  
RAN Bin<sup>5</sup>, LIU Ping<sup>6</sup>, ZHAO Hongmin<sup>1,2</sup>, ZHOU Fei<sup>7</sup>

收稿日期: 2025-03-10

基金项目: 重庆市科技兴林重大专项项目(2D2022-4); 重庆市中央林业改革发展资金科技推广示范项目(渝林科推〔2023 年〕14 号); 重庆市中央林业改革发展资金科技推广示范项目(渝林科推〔2024 年〕3 号); 重庆市科研机构绩效激励引导专项(CSTB2023JXJL-YFX0096)。

作者简介: 曾清苹, 硕士, 工程师, 主要从事竹林培育、土壤环境与生态过程研究。

通信作者: 童龙, 博士。

1. Chongqing Academy of Forestry, Chongqing 400036, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Forest Ecological Restoration and Utilization in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400036, China;
3. International Centre for Bamboo and Rattan Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100102, China;
4. School of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;
5. Forest Tree Seed and Seedling Administration of Fengdu County, Chongqing 408200, China;
6. Forestry Bureau of Xiushan County, Chongqing 409900, China;
7. Chongqing Zhonglinfeng Technology Development Co., Ltd., Chongqing 400036, China

**Abstract:** Land use/cover change (LUCC) is a significant driver of changes in regional ecosystem carbon storage. Understanding the response of carbon storage to LUCC is crucial for achieving regional “dual carbon” strategic goals. Based on multi-period LUCC dataset, this study utilized the carbon storage module of the InVEST model to explore the relationship between land use type transformation and carbon storage changes in Chongqing. The study also employed the center of gravity model and hot-spot/cold-spot clustering analysis to further explain the spatial-temporal distribution characteristics of carbon storage and its response to land use changes in Chongqing. From 1980 to 2020, the land use types in Chongqing experienced dramatic changes, with large areas of cropland and grassland converted to forest land, which increased by 1.97 times. The carbon storage exhibited a trend of first decreasing and then increasing, with the most significant change occurring between 2000 and 2020, during which carbon storage increased by  $327.77 \times 10^6$  t. Spatially, the carbon storage center of gravity experienced a migration process from “northeast to southeast to northwest”, with an overall southeastward shift of 1 652.88 m. The “hotspot clusters” of carbon storage were mainly distributed in the Three Gorges Reservoir area of northeastern Chongqing and the Wuling Mountains area of southeastern Chongqing, while the “cold spot clusters” were concentrated in the main urban area of Chongqing and its surrounding regions.

**Key words:** land use; carbon storage; center of gravity analysis; clustering analysis; Chongqing

碳储量是生态系统服务评估中广泛应用的重要指标之一,是评估陆地生态系统生产能力并反映其对气候变化响应的重要参数<sup>[1]</sup>。在社会经济活动的持续影响下,大气中 CO<sub>2</sub> 浓度以约 0.5% 的年增长率上升<sup>[2]</sup>,全球气候变暖问题日益严峻,极端天气事件频繁发生。陆地生态系统碳储量能够有效降低大气中 CO<sub>2</sub> 浓度,对其研究有助于区域层面缓解温室效应和气候变化<sup>[3]</sup>。然而,随着社会经济的不断发展,人类活动对陆地生态系统的影响日益显著,进一步改变了土地利用格局,其中约 60% 的土地利用/覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)与人类活动直接相关<sup>[4]</sup>。已有研究表明,LUCC 是影响碳储量的主要驱动因素之一<sup>[5-7]</sup>,并显著影响其时空分布格局。中国作为全球主要碳排放国家之一<sup>[8]</sup>,于 2020 年正式提出“双碳目标”——力争在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和。因此,研究 LUCC 与碳储量之间的关系,分析土地利用类型变化对碳储量的影响机制,对于优化土地资源配置、提升生态系统功能具有重要的现实意义。

近年来,国内外学者针对碳储量的定量研究集中在两个方面:① 对碳储量等典型的生态系统服务开展定量计算与时空分布特征分析,并在此基础上开展与生态景观格局、生态功能区划等相关研究<sup>[9-10]</sup>;② 利用土地利用数据,通过耦合 InVEST 模型与相关预测模型,研究不同情景下碳储量的时空变化,并据此为相关政策制定提供依据<sup>[5, 11-12]</sup>。由此可见,对碳储量时空分布的定量分析是相关研究的基础内容。尽管评估碳储量的模型较多,InVEST 模型凭借其操作简单、参数需求少和结果可视化等优势被广泛应用<sup>[13]</sup>,利用 InVEST 模型可以实现长时间序列下 LUCC 的过程推演和变化模拟<sup>[14]</sup>。因此,

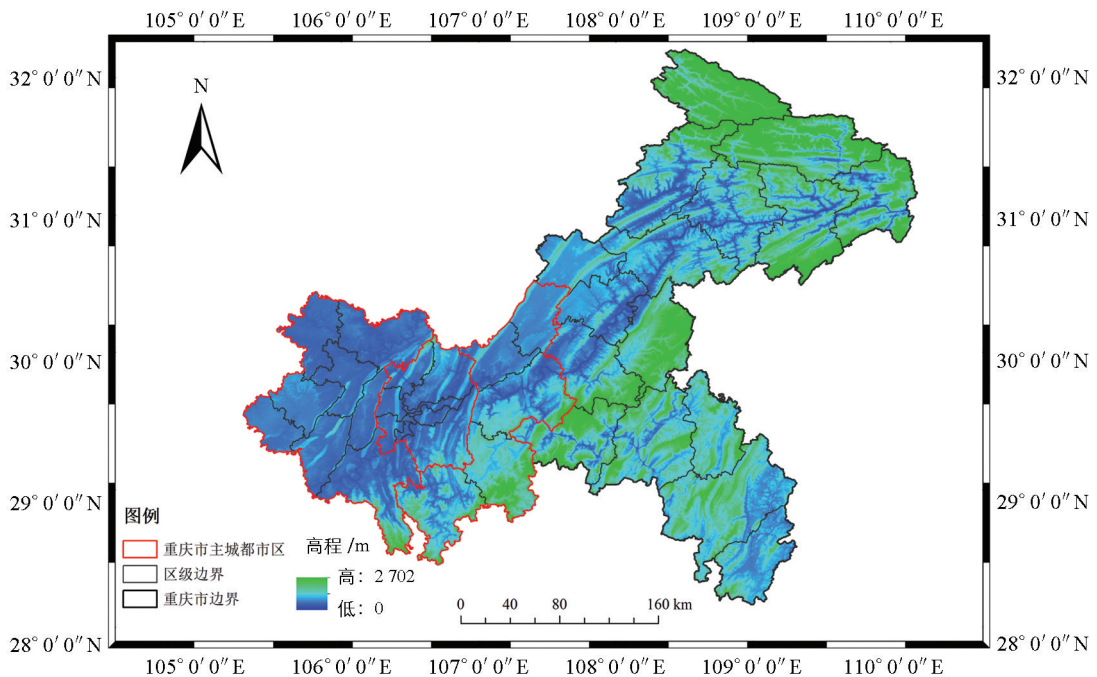
通过耦合 LUCC 数据和 InVEST 模型, 可系统评估土地利用/覆被变化对区域碳储量的影响, 为提升模拟精度提供支撑<sup>[15]</sup>。

重庆是典型的山地城市, 土地利用类型多样且差异显著, 加之喀斯特地貌广泛分布, 使该地区生态系统尤为脆弱和敏感。对重庆市碳储量的研究仍是山地城市生态系统研究的重要内容。随着城镇化的快速推进, 大量自然生态用地被转化为建设用地, 土地利用结构发生了显著变化, 不同时期的土地利用格局差异明显。然而, 现有研究时段多集中在 2000 年、2010 年和 2020 年<sup>[16]</sup>, 且多以三峡库区<sup>[17]</sup>和重庆主城区<sup>[18]</sup>等特定区域为研究对象, 主要探讨土地利用/覆被变化对碳储量的影响, 或仅关注某一特定地类转变与碳储量变化之间的关系<sup>[16, 19]</sup>, 或将重点放在未来碳储量的预测<sup>[20]</sup>, 或侧重不同土地利用数据集对碳储量结果不确定性的分析<sup>[21]</sup>。因此, 本研究聚焦重庆市碳储量的长时间序列变化, 重点分析土地利用/覆被变化对碳储量的时间响应特征, 以及碳储量变化对土地利用类型转变的响应关系。这对于实现土地资源的合理利用、维护城市生态系统健康以及推动城市生态管理具有重要意义。

本研究以重庆市为对象, 基于收集的 1980—2020 年土地利用数据及各土地利用类型碳密度数据, 利用 InVEST 模型模拟不同城镇化阶段下碳储量的时空变化分布特征, 并结合空间尺度的重心迁移模型和冷热点分析方法, 深入揭示长时间序列内重庆市碳储量时空分布特征与土地利用/覆被变化的响应关系, 旨在为重庆市实现“双碳”战略目标提供参考依据和理论支撑。

## 1 研究区概况

重庆市位于我国西南地区(28°10′—32°13′N, 105°11′—110°11′E, 图 1), 面积为  $8.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 属于亚热带季风气候, 特点是高温多雨, 降水主要集中在 5—9 月, 占全年降水量的 70%。该地区地形复杂, 山地面积约占 76%, 而平原和河谷地区仅占 2%。区域内的主要山脉包括东部的大巴山、大娄山和武陵山脉, 西北和中部则以低山丘陵为主。境内河流众多, 主要有长江、嘉陵江和乌江等。作为长江上游的经济和交通枢纽, 重庆市的城镇化进程持续加快, 截至 2022 年, 其常住人口达到 3 213.34 万人, 城镇化率为 70.96%, 地区生产总值为 2.91 万亿元。



审图号: GS(2023)2767 号。下同。

图 1 研究区地理示意位置图

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本研究选取 1980、1990、2000、2010 和 2020 年作为研究年份,旨在从长期尺度上刻画研究对象的演变过程。上述年份以 10 年为时间间隔,覆盖近 40 年的关键发展阶段,能够较为全面地反映不同时期的阶段性变化特征。1980—2020 年 5 期土地利用类型数据均来源于中国科学院资源与环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率均为 30 m,采用现状一级分类系统,将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类用地类型。为了提高碳密度的精度,已有研究表明碳密度与降水、气温相关<sup>[22]</sup>,用于修正碳密度的全国和重庆市年均降水量与年均气温数据分别来源于国家统计局(<http://www.stats.gov.cn/>)和重庆市统计局(<http://tjj.cq.gov.cn/>)。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 基于 InVEST 模型的 CS 估算

InVEST 3.12.1 模型的 Carbon 模块被用于计算区域碳储量的空间分布。该模块将陆地生态系统碳库分为地上生物碳库、地下生物碳库、土壤碳库和凋落物碳库。其计算公式如下:

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

式中:  $C_{\text{total}}$  为生态系统的总碳储量(t);  $C_{\text{above}}$  为地上生物碳储量(t),  $C_{\text{below}}$  为地下生物碳储量(t),  $C_{\text{soil}}$  为土壤碳储量(t);  $C_{\text{dead}}$  为凋落物碳储量(t)。

各碳库碳储量由碳密度与其对应的土地利用面积的乘积估算得到。为提高研究区碳密度参数的准确性,模型运行前对碳密度参数进行了修正校正,具体方法见式(2)–(5)。

$$K_{\text{BP}} = \frac{-0.4 \times \text{MAP} + 43}{-0.4 \times \text{MAP}' + 43} \quad K_{\text{BT}} = \frac{0.03 \times \text{MAT} + 14.3}{0.03 \times \text{MAT}' + 14.3} \quad (2)$$

$$K_{\text{B}} = \text{Average}(K_{\text{BP}}, K_{\text{BT}}) \quad (3)$$

$$K_{\text{SP}} = \frac{3.4 \times \text{MAP} + 157.7}{3.4 \times \text{MAP}' + 157.7} \quad K_{\text{ST}} = \frac{0.07 \times \text{MAT} + 79.1}{0.07 \times \text{MAT}' + 79.1} \quad (4)$$

$$K_{\text{S}} = \text{Average}(K_{\text{SP}}, K_{\text{ST}}) \quad (5)$$

式中:  $K_{\text{BP}}$  和  $K_{\text{BT}}$  为降水和温度的生物量系数;  $K_{\text{B}}$  为最终生物量修正系数;  $K_{\text{SP}}$  和  $K_{\text{ST}}$  代表降水和温度的土壤系数;  $K_{\text{S}}$  为最终土壤有机修正系数;  $\text{MAP}$  和  $\text{MAP}'$  分别代表重庆市和全国的年平均降水量(mm)<sup>[23]</sup>;  $\text{MAT}$  和  $\text{MAT}'$  分别代表重庆市和全国的年平均温度(°C)。通过将修正系数乘以全国碳密度数据<sup>[24]</sup>,确定得到重庆市各部分的碳密度数据。InVEST 模型所需的各地类碳密度数据主要参考重庆市或西南地区的碳密度数据,并加以修正得出<sup>[6, 20, 25]</sup>。重庆市最终碳密度如表 1 所示。

表 1 重庆市土地利用类型碳密度数据

土地利用类型	碳密度/(t · hm <sup>-2</sup> )			
	$C_{\text{above}}$	$C_{\text{below}}$	$C_{\text{soil}}$	$C_{\text{dead}}$
耕地	3.45	0.64	68.24	1.00
林地	40.59	27.36	121.94	3.93
草地	14.07	18.58	78.97	0.94
水域	6.90	0.00	0.00	0.00
建设用地	1.45	2.06	29.49	0.00
未利用地	5.80	3.67	32.29	0.00

#### 2.2.2 重心分析

重心是区域内某种属性值在空间范围内某一时刻的力矩平衡点,用来表征该点在空间上的平衡状态<sup>[26]</sup>。本研究中碳储量的重心指区域内碳储量在空间上的平衡状态,可反映碳储量空间格局的变化方向与强度;若有偏移则表明碳储量发展的“高值区”部位发生改变。利用 ArcGIS 中的重心分析工具来构建碳储

量重心模型<sup>[27]</sup>, 以揭示研究区碳储量的空间变化轨迹特征。公式如下:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i X_i)}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (6)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i Y_i)}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (7)$$

式中:  $X$  为重心坐标的经度;  $Y$  为重心坐标的纬度;  $X_i$  为第  $i$  个单元中心的经度坐标值;  $Y_i$  为第  $i$  个单元中心的纬度坐标值;  $M_i$  为第  $i$  个单元的总碳储量;  $n$  为单元总数。

### 2.2.3 冷热点分析

在探索地理空间数据样本点的集聚规律或融合程度时常使用冷热点分析方法, 其中热点代表统计意义上具有显著性的高值, 冷点代表统计意义上具有显著性的低值, 能够反映样本点的空间聚类位置<sup>[28]</sup>。本研究基于求得的研究区各地类碳储量数据, 利用 ArcGIS 10.8 中的 Getis-Ord General 工具来构建聚类分析模型<sup>[24]</sup>, 以阐明重庆市碳储量空间聚类分布特征。具体公式如下:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} M_i M_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_i M_j} \quad i \neq j \quad (8)$$

式中:  $G$  为冷热点值, 值为正值且越高说明热点聚类越集中, 即为热点区域, 值为负值且越低说明冷点聚类越分散, 即为冷点区;  $M_j$  为第  $j$  个单元的碳储量变化量,  $W_{ij}$  为要素  $i$  和要素  $j$  的空间权重矩阵。

## 3 结果与分析

### 3.1 重庆市土地利用时空变化分析

在 1980 至 2020 年期间, 重庆市不同区域土地利用格局存在差异性, 其中重庆市中西部地区的土地利用类型空间分布格局基本保持稳定(图 2)。重庆市主要的土地利用类型为耕地、林地和草地, 三者面积合计占比超过 90%。草地和耕地广泛分布于中西部的丘陵和低山地区, 而林地则呈片状集中分布在渝东北的三峡库区和渝东南的武陵山区, 建设用地则主要分布在主城区。由图 3 和表 2 可以看出, 1980—2020 年间, 重庆市土地利用发生了显著变化, 城市建设用地主要是由耕地转化, 2020 年面积达 2 385.24 km<sup>2</sup>, 是 1980 年的 5.71 倍。在空间上, 建设用地扩张主要集中在重庆主城区, 呈现出“多方向、多条带”的辐射状扩张趋势。受退耕还林政策影响, 林地面积大幅增加, 共增长 29 432.48 km<sup>2</sup>, 并向中西部大规模扩张, 而耕地和草地面积则逐渐减少。

表 2 1980—2020 年重庆市土地利用转移矩阵

土地利用类型	2020 年土地利用面积/km <sup>2</sup>						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
1980 年土地利用面积/km <sup>2</sup>							
耕地	10 709.40	25 758.46	362.41	245.78	1 722.42	4.65	38 803.12
林地	156.25	29 658.84	292.65	118.55	189.11	2.31	30 417.71
草地	285.55	4 394.28	6 933.16	79.32	74.82	1.75	11 768.88
水域	7.53	24.56	3.24	867.66	10.92	1.03	914.94
建设用地	3.95	11.30	0.67	14.33	387.50	0.08	417.83
未利用地	0.09	2.75	0.34	4.95	0.47	9.27	17.87
总计	11 162.77	59 850.19	7 592.47	1 330.59	2 385.24	19.09	82 340.35

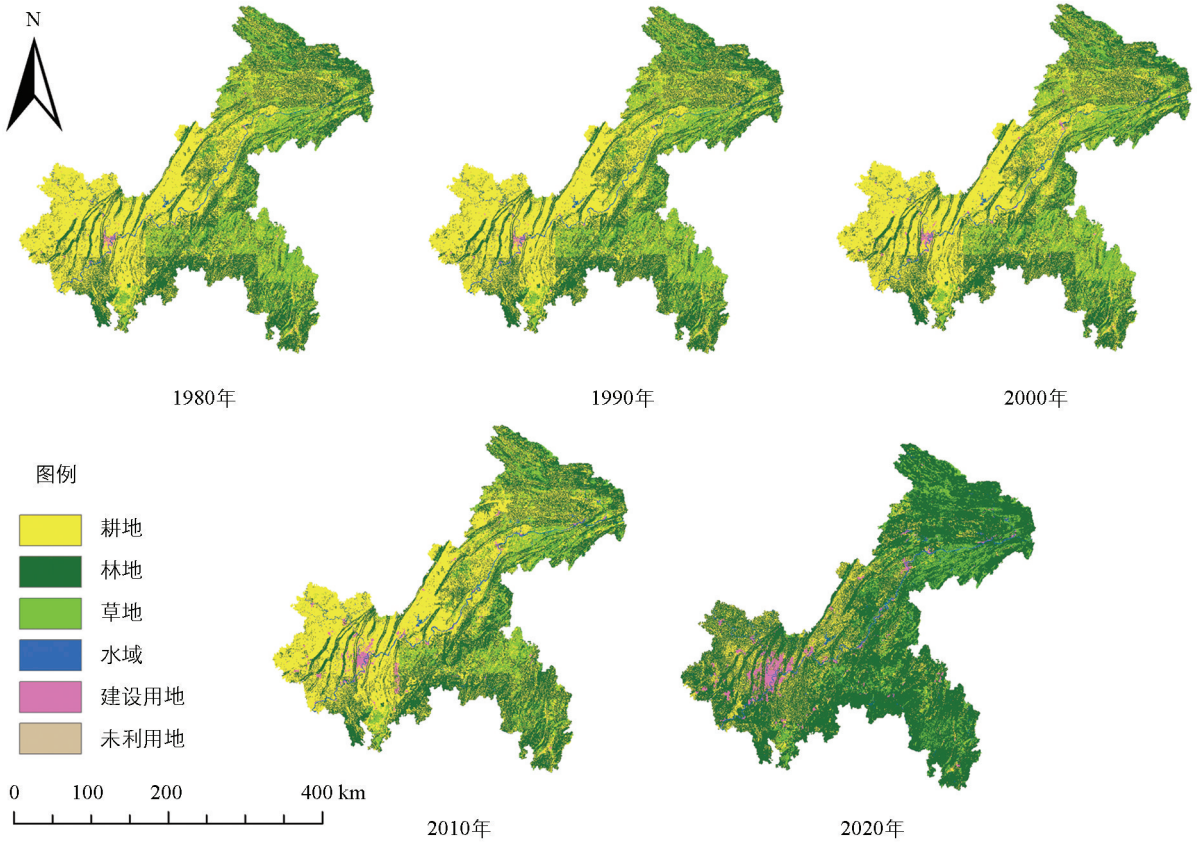


图 2 1980—2020 年重庆市土地利用类型空间分布

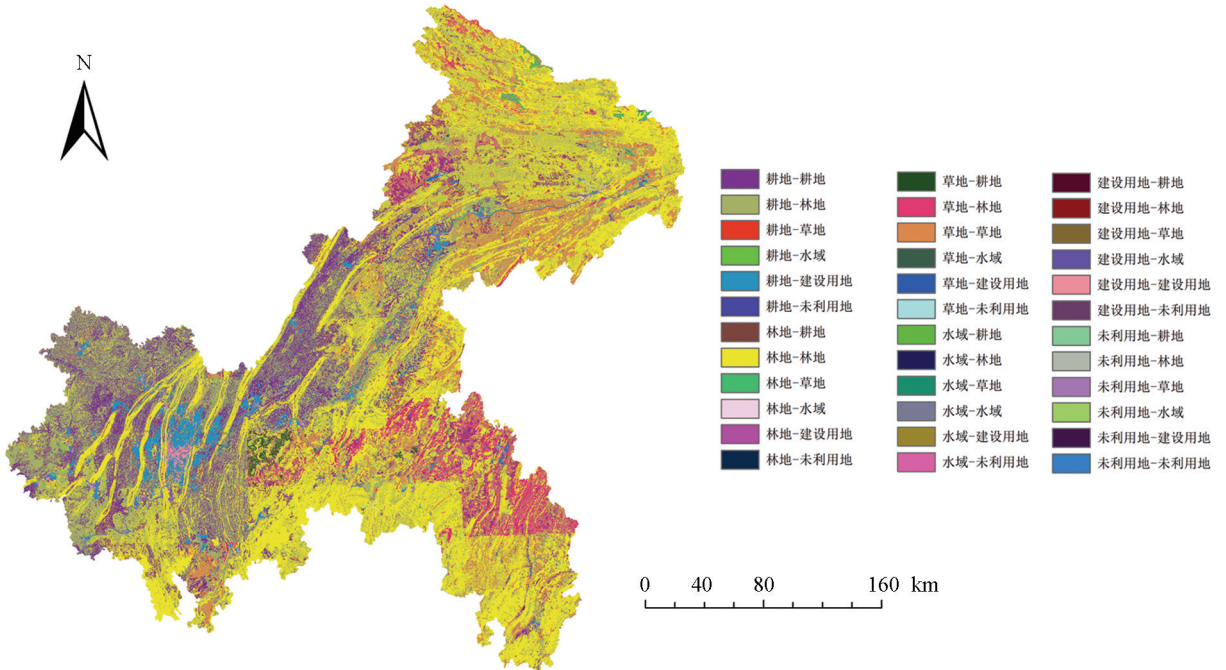


图 3 1980—2020 年重庆市土地利用变化图谱

### 3.2 重庆市碳储量时空变化分析

#### 3.2.1 碳储量时间变化特征

表 3 显示, 1980—2020 年重庆市碳储量分别为  $1\ 008.66 \times 10^6$  t、 $1\ 009.11 \times 10^6$  t、 $1\ 008.63 \times 10^6$  t、 $1\ 021.29 \times 10^6$  t、 $1\ 336.4 \times 10^6$  t, 呈先下降后上升趋势。其中, 1980—1990 年间碳储量变化并不显著,

仅上升了  $0.45 \times 10^6$  t; 1990—2000 年间碳储量变化量为  $-0.48 \times 10^6$  t; 2000—2010 年间碳储量变化为  $-12.66 \times 10^6$  t; 2010—2020 年间碳储量变化量为  $315.11 \times 10^6$  t, 该阶段为碳储量增长的高峰期, 主要原因是退耕还林工程的大规模实施, 显著增加了林地面积。1980—2020 年间, 重庆市不同土地利用类型转变导致的碳储量变化趋势各异。其中, 耕地和草地的碳储量显著减少, 研究期间变化量分别为  $-202.68 \times 10^6$  t 和  $-47.00 \times 10^6$  t, 且分别在 2010—2020 年和 2000—2010 年间降幅最大; 林地和建设用地的碳储量明显增加, 研究期间变化量分别为  $570.63 \times 10^6$  t 和  $6.49 \times 10^6$  t, 且分别在 2010—2020 年和 2000—2010 年间增幅最大; 而水域和未利用地的碳储量变化不显著。

表3 1980—2020年重庆市各地类碳储量

土地利用类型	碳储量( $10^6$ t)				
	1980年	1990年	2000年	2010年	2020年
耕地	284.54	284.62	283.14	279.46	81.86
林地	589.56	589.89	590.53	636.06	1160.19
草地	132.47	132.52	132.24	100.43	85.47
水域	0.63	0.63	0.63	0.79	0.92
建设用地	1.38	1.38	2.01	4.49	7.87
未利用地	0.07	0.07	0.07	0.05	0.08

### 3.2.2 碳储量空间分布变化特征

图4表明, 1980—2020年重庆市碳储量具有显著的空间异质性。其中, 碳储量高值区( $30 \sim 42$  t)多呈片状分布在渝东北和渝东南地区, 且带状面积在2010年后明显增加, 这些区域多为林地, 直接增加了森林的碳汇功能; 碳储量中值区( $5 \sim 30$  t)多呈片状广泛分布于中西部地区, 这些区域主要为耕地和草地; 碳储量低值区( $< 5$  t)呈团状分布于西南部地区, 并以辐射状向四周扩张, 面积持续扩大, 原因在于该区域为重庆市主城区, 城镇化进程迅速, 建设用地的增加进一步加剧了碳储量的流失。整体来看, 1980—2000年碳储量空间格局变化相对明显; 2000—2020年, 得益于退耕还林政策的实施, 重庆市大量碳储量中值区转为高值区, 碳储量显著提升。

### 3.2.3 碳储量重心轨迹特征

1980—2020年重庆市碳储量重心位置基本稳定在  $30^{\circ}3' - 30^{\circ}4'N$ ,  $107^{\circ}55' - 107^{\circ}57'E$  范围内, 位于丰都县, 移动轨迹呈左倾“V”型。其中, 1980年与1990年碳储量重心位置基本重合; 1990—2000年碳储量重心向东北方向移动了 167.47 m; 2000—2010年碳储量重心向东南方向移动了 1 240.92 m; 2010—2020年碳储量重心移动距离最大, 向西北方向偏移了 2 905.81 m。整体来看, 重庆市碳储量南北差异变化不大, 其演变轨迹表明碳储量空间分布在多年间均保持在小范围波动(图5)。

### 3.2.4 碳储量空间聚类特征

在1980—2020年期间, 重庆市的碳储量冷热点空间格局基本保持稳定, 但个别区县的冷热点等级发生了显著变化。具体而言, 碳储量热点区主要集中在重庆市东部地区, 其中东北和东南地区热点等级最高, 土地利用类型以林地和草地为主; 而东中部地区则为次热点区, 土地利用类型以林地、草地和耕地为主。相对而言, 碳储量冷点区呈环带状分布, 由内向外依次为“冷点区—次冷点区—过渡区”, 主要土地利用类型为耕地和建设用地。在此期间, 荣昌区由次冷点区转变为过渡区, 梁平区和垫江县则由过渡区转变为次热点区, 万州区和彭水苗族土家族自治县则由次热点区转变为热点区。这表明重庆市整体碳储量显著增加, 且东部地区的碳储量水平相较于西部地区更高(图6)。

## 3.3 土地利用变化对碳储量的响应分析

由表4可知, 1980—2020年重庆市土地利用变化导致总碳储量增加了  $327.74 \times 10^6$  t, 地上生物碳储量、地下生物碳储量、土壤碳储量和凋落物碳储量分别增加了  $104.67 \times 10^6$  t、 $71.43 \times 10^6$  t、 $143.22 \times 10^6$  t

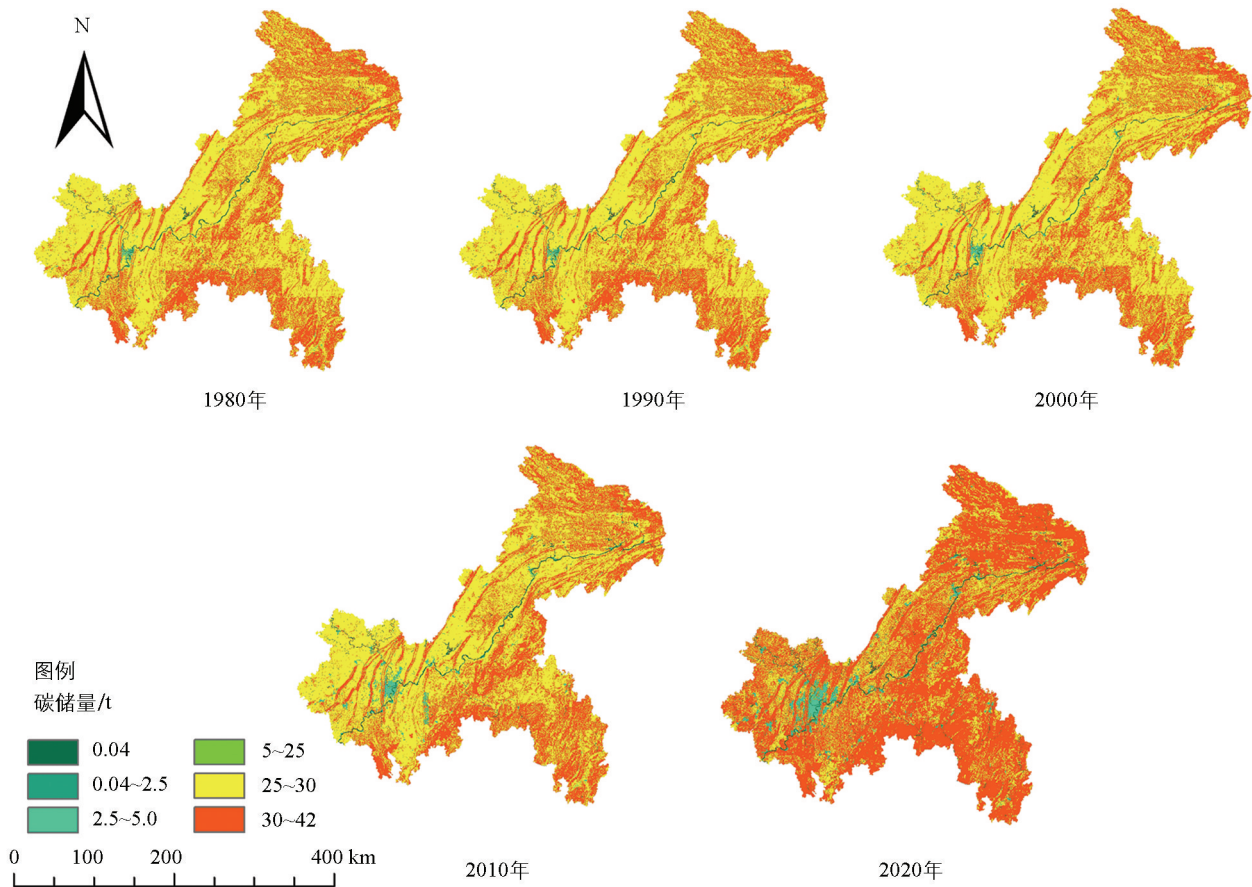


图 4 1980—2020 重庆市碳储量空间分布

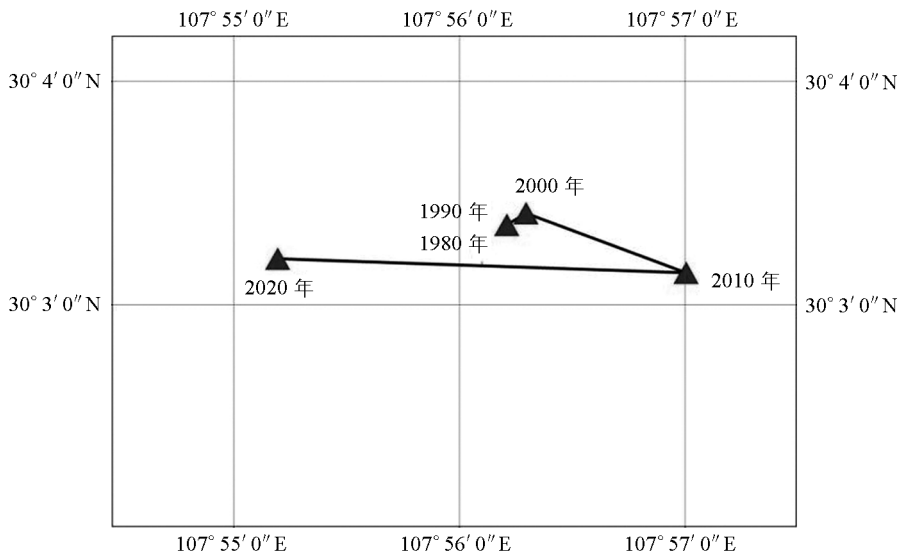


图 5 1980—2020 年重庆市碳储量重心转移轨迹

和  $8.41 \times 10^6$  t。其中,耕地转林地碳储量增加了  $310.37 \times 10^6$  t, 占总碳储量变化量的 94.75%; 草地转林地碳储量增加了  $35.71 \times 10^6$  t, 占总碳储量变化量的 10.9%; 水域转林地碳储量增加了  $0.46 \times 10^6$  t, 占总碳储量变化量的 0.14%。此外,耕地转建设用地、林地转建设用地分别导致碳储量减少了  $6.95 \times 10^6$  t、 $3.04 \times 10^6$  t。综合来看,土地利用与覆被变化(LUCC)是研究区碳储量变化的重要驱动因素之一,且耕地—林地、草地—林地转变导致植被和土壤碳储量显著增加,而耕地—建设用地、林地—建设用地—水域等转变使得植被和土壤碳储量进一步减少。

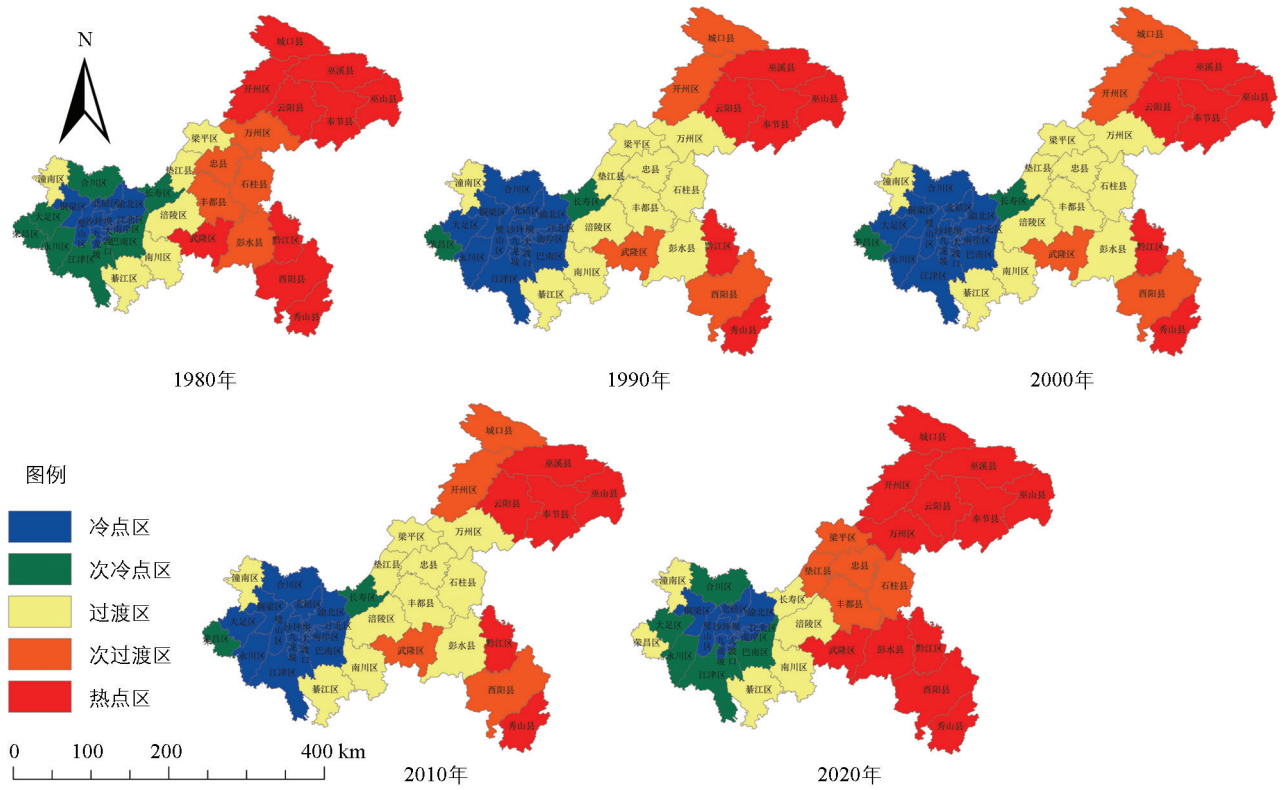


图 6 1980—2020 年重庆市碳储量冷热点分布

表 4 1980—2020 年重庆市各地类土地利用转变引起的碳储量变化

土地利用 类型变化	面积/km <sup>2</sup>	碳储量变化量/10 <sup>6</sup> t				
		总碳储量	地上生物碳储量	地下生物碳储量	土壤碳储量	凋落物碳储量
耕地—耕地	10 709.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
耕地—林地	25 758.46	310.37	95.67	68.83	138.32	7.55
耕地—草地	362.40	1.42	0.38	0.65	0.39	0.00
耕地—水域	245.77	-1.63	0.08	-0.02	-1.68	-0.02
耕地—建设用地	1 722.42	-6.95	-0.34	0.24	-6.67	-0.17
耕地—未利用地	4.65	-0.01	0.00	0.00	-0.02	0.00
林地—耕地	156.25	-1.88	-0.58	-0.42	-0.84	-0.05
林地—林地	29 658.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
林地—草地	292.64	-2.38	-0.78	-0.26	-1.26	-0.09
林地—水域	118.55	-2.22	-0.40	-0.32	-1.45	-0.05
林地—建设用地	189.11	-3.04	-0.74	-0.48	-1.75	-0.07
林地—未利用地	2.31	-0.04	-0.01	-0.01	-0.02	0.00
草地—耕地	285.54	-1.12	-0.30	-0.51	-0.31	0.00
草地—林地	4 394.28	35.71	11.65	3.86	18.88	1.31
草地—草地	6 933.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
草地—水域	79.32	-0.84	-0.06	-0.15	-0.63	-0.01
草地—建设用地	74.82	-0.60	-0.09	-0.12	-0.37	-0.01
草地—未利用地	1.75	-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00

续表 4

土地利用 类型变化	面积/km <sup>2</sup>	碳储量变化量(10 <sup>6</sup> t)				
		总碳储量	地上生物碳储量	地下生物碳储量	土壤碳储量	凋落物碳储量
水域—耕地	7.53	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00
水域—林地	24.56	0.46	0.08	0.07	0.30	0.01
水域—草地	3.24	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00
水域—水域	867.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
水域—建设用地	10.92	0.03	-0.01	0.00	0.03	0.00
水域—未利用地	1.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
建设用地—耕地	3.95	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00
建设用地—林地	11.30	0.18	0.04	0.03	0.10	0.00
建设用地—草地	0.67	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
建设用地—水域	14.33	-0.04	0.01	0.00	-0.04	0.00
建设用地—建设用地	387.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
建设用地—未利用地	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用地—耕地	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用地—林地	2.75	0.04	0.01	0.01	0.02	0.00
未利用地—草地	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用地—水域	4.95	-0.02	0.00	0.00	-0.02	0.00
未利用地—建设用地	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用地—未利用地	9.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

1980—2020年,重庆市碳储量呈上升趋势,增长量为 $327.74 \times 10^6$  t。这主要与重庆市实施退耕还林工程有关。而在我国其他典型城市,随着城市化进程推进,耕地被大量占用并转化为建设用地,林地、草地和耕地面积减少,碳储量因此呈下降趋势<sup>[29-31]</sup>。自2000年重庆市实施退耕还林工程以来,为耕地保护和生态安全发挥了显著作用,取得了良好成效<sup>[32]</sup>。林地面积的增加显著提升了森林碳汇能力。在相同区域的研究中,屈志光等<sup>[20]</sup>认为,重庆市2000—2020年碳储量变化范围为 $0.656 \times 10^9$  t~ $0.742 \times 10^9$  t,低于本研究结果( $1.01 \times 10^9$  t~ $1.34 \times 10^9$  t)。造成上述差异的主要原因在于碳密度取值不同,但总体上两者均反映了土地利用/覆被变化与碳储量变化之间的关系。可见,碳密度作为评估碳储量的重要参数,其取值范围对结果的准确性具有重要影响。目前,利用InVEST模型开展重庆市碳储量研究时,碳密度数据多通过查阅和整合文献获得<sup>[20, 33]</sup>,但已有研究指出,碳密度与区域降水和气温变化密切相关<sup>[22]</sup>。为提高重庆市碳储量计算的精度,本研究充分结合实测数据与修正数据,以期获得更为准确的评估结果。在重庆市碳储量空间分布研究方面,本研究利用重心分析和冷热点分析得出了碳储量在空间上的集聚性。结果表明,重庆市碳储量呈现出“中西部低、东部高,聚集度明显”的分布特征。具体来说,以主城区为冷点区,向外环状扩展后逐步上升为热点区。其中,西部主城区碳储量最低,东北部巫山县、巫溪县、云阳县和奉节县等地碳储量最高。该分布特征与Liu等<sup>[34]</sup>和Zhu等<sup>[35]</sup>的研究结果基本一致。本研究在此基础上进一步利用重心分析得出了重庆市碳储量的重心地区为丰都县。

InVEST模型通过整合土地利用数据和碳库数据来计算陆地生态系统的碳储量,其特点在于可以快速

且高效地评估不同土地利用类型的碳储量及其分布,具有操作简便、效率高和评估精度高的优势。除碳密度作为模型输入数据外,土地利用数据是另一项重要输入数据。LUCC已被证实是影响碳储量估算的关键驱动因素<sup>[11, 36]</sup>。研究期间,人类活动导致了LUCC发生变化,重庆市耕地转为林地使碳储量增加了 $310.37 \times 10^6$  t,占碳储量总变化量的94.75%;林地规模和聚集度的提高是造成研究区碳储量时空分布异质性的主要因素,这与已有研究结论基本一致<sup>[37]</sup>。耕地转为建设用地使碳储量减少了 $6.95 \times 10^6$  t,是造成重庆市碳净损失的主要原因。虎帅等<sup>[38]</sup>的研究也表明,建设用地的扩张是导致重庆市碳储量下降的关键因素,其中约90%的扩张来源于耕地和阔叶林。因此,LUCC是影响重庆市碳储量变化的主要因素,碳储量对其变化具有显著响应。未来,重庆市应进一步加强耕地保护,严守耕地红线,提高耕地利用效率,同时持续推进退耕还林还草等政策的实施,促进土地资源的合理利用,助力实现“双碳”目标。在城市化不断推进的背景下,应确保碳储量保持稳定增长,推动经济、资源与环境的协调发展<sup>[39]</sup>。尽管InVEST模型已被广泛应用于不同空间尺度的陆地生态系统碳储量研究,但该模型未充分考虑不同植被和土壤结构对碳储量差异的影响,因此其计算结果存在一定的不确定性<sup>[40]</sup>。同时,碳密度的取值应尽可能采用实测数据,以提高模型精度,使结果更具时效性和准确性。因此,未来研究应结合年际实地观测,充分考虑不同植被和土壤对碳储量的影响,提高碳密度数据的可靠性,为深入研究不同地类的碳储量提供更有力的数据支撑。值得注意的是,碳循环是一个复杂的过程,碳储量的变化受多种因素共同作用的影响。本研究仅从土地利用角度探讨其对碳储量时空异质性的影响,未来还应综合考虑自然环境因子和社会经济因子(如植被、土壤、气候、城市建设、交通分布和人口增长等),为重庆市生态保护及“双碳”目标的实现提供更有针对性的理论依据与建议。

#### 4.2 结论

本研究利用InVEST模型结合不同时期土地利用数据对1980—2020年重庆市碳储量的时空分布进行了解析,并采用重心分析和冷热点分析方法探讨了重庆市碳储量的空间集聚性。研究结果如下:①1980—2020年重庆市土地利用未发生变化的面积为4.87万 $\text{km}^2$ ,发生变化的面积为3.38万 $\text{km}^2$ ,土地利用变化率为41.02%。林地面积从1980年的3.04万 $\text{km}^2$ 增加至2020年的5.99万 $\text{km}^2$ ;②重庆市碳储量空间聚集特征显著,“热点聚集区”主要分布在渝东北三峡库区和渝东南武陵山区,其中碳储量重心在研究期间内一直位于三峡库区腹地的丰都县,“冷点聚集区”主要集中于重庆市主城区,表明东部地区各县市的碳储量资源较西部地区更为丰富;③LUCC导致重庆市碳储量增加了32.49%(由 $1.01 \times 10^9$  t增至 $1.34 \times 10^9$  t),表明LUCC对重庆市陆地碳库具有明显的增汇效应。本研究为重庆市实现“双碳”目标提供了科学依据,对促进区域生态系统可持续发展具有重要现实意义。

#### 参考文献:

- [1] LIANG Y J, HASHIMOTO S, LIU L J. Integrated Assessment of Land-Use/Land-Cover Dynamics on Carbon Storage Services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050 [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106939.
- [2] NEFTEL A, MOOR E, OESCHGER H, et al. Evidence from Polar Ice Cores for the Increase in Atmospheric  $\text{CO}_2$  in the Past Two Centuries [J]. *Nature*, 1985, 315(6014): 45-47.
- [3] 张燕,师学义,唐倩.不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J].*生态学报*,2021,41(1):360-373.
- [4] 赵宗慈,罗勇,黄建斌.全球变暖与城市[J].*气候变化研究进展*,2024,20(4):504-508.
- [5] 田多松,傅碧天,吕永鹏,等.基于SD和CLUE-S模型的区域土地利用变化对土壤有机碳储量影响研究[J].*长江流域资源与环境*,2016,25(4):613-620.
- [6] 周红韵,叶润成,韩会庆,等.山地城市土地利用变化对碳储量影响的情景模拟——以贵阳市为例[J].*华北水利水电大学学报(自然科学版)*,2025,46(5):119-131.
- [7] 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.
- [8] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献 [J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574.
- [9] 段如梦, 李晓宇, 张清. 吉林西部生态系统服务功能权衡/协同关系及生态服务簇时空演变 [J]. 环境科学, 2025, 46(11): 7222-7233.
- [10] 张宇洁, 张晓萍, 孙伟楠, 等. 1970—2020 年北洛河流域产水、保土、固碳生态系统服务时空演变特征与权衡/协同关系 [J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 365-377.
- [11] LI Y X, LIU Z S, LI S J, et al. Multi-Scenario Simulation Analysis of Land Use and Carbon Storage Changes in Changchun City Based on FLUS and InVEST Model [J]. Land, 2022, 11(5): 647.
- [12] LIU K, ZHANG C Z, ZHANG H, et al. Spatiotemporal Variation and Dynamic Simulation of Ecosystem Carbon Storage in the Loess Plateau Based on PLUS and InVEST Models [J]. Land, 2023, 12(5): 1065.
- [13] WANG A, ZHANG M M, KAFY A A, et al. Predicting the Impacts of Urban Land Change on LST and Carbon Storage Using InVEST, CA-ANN and WOA-LSTM Models in Guangzhou, China [J]. Earth Science Informatics, 2023, 16(1): 437-454.
- [14] 王伟武, 伏添乐, 陈欢. 基于 PLUS-InVEST 模型的长三角城市群碳储量时空演变与预测 [J]. 环境科学, 2025, 46(4): 1937-1950.
- [15] 谢晨新, 张守红, 李华林, 等. 1987—2020 年昕水河流域土地利用变化对碳储量的影响 [J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8021-8032.
- [16] 刘亚丽, 曹春霞, 张臻, 等. 山地城市国土空间碳排放格局与绿色指标体系构建研究——以重庆市为例 [J]. 城乡规划, 2024(3): 43-52.
- [17] 重庆市规划和自然资源局. 重庆市国土空间总体规划(2021—2035 年) [EB/OL]. (2021-05-27) [2024-12-30]. [http://ghzrzyj.cq.gov.cn/ztlm\\_186/ghgb/ztgh/202406/t20240617\\_13297790.html](http://ghzrzyj.cq.gov.cn/ztlm_186/ghgb/ztgh/202406/t20240617_13297790.html).
- [18] 朱诗柔, 牟风云, 黄淇, 等. 2000—2030 年多级流域尺度下重庆市林地景观格局碳储量变化 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 356-366.
- [19] 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.
- [20] 张骞, 高明, 杨乐, 等. 1988—2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化 [J]. 生态学报, 2017, 37(2): 566-575.
- [21] 孟祥江, 何丙辉, 马正锐, 等. 重庆市 2005—2013 年土地利用变化对植被碳储量的影响 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 75-81.
- [22] TANG X L, ZHAO X, BAI Y F, et al. Carbon Pools in China's Terrestrial Ecosystems: New Estimates Based on an Intensive Field Survey [J]. PNAS, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [23] 靳军英, 王林, 金铁生, 等. 基于 REOF 的不同量级降雨侵蚀力时空变化——以重庆市为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025(1): 163-177.
- [24] 王洪彦, 郑文璐, 盖兆雪. 基于 InVEST 模型的黑土区碳储量时空分异特征 [J]. 环境科学学报, 2024, 44(7): 473-481.
- [25] 杨静怡, 吴峰. 贵阳市 1980—2018 年土地覆盖类型及碳储量变化研究 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(4): 115-121.
- [26] 屈志光, 杨伯元, 李飞, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的重庆市碳储量时空演化及情景预测 [J]. 三峡生态环境监测, 2024, 9(3): 62-74.
- [27] 李岩, 黄超傑, 王珂, 等. 安徽省森林生态承载力及其重心迁移研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(1): 87-96.
- [28] 丁学谦, 吴群, 文高辉, 等. 2005—2019 年洞庭湖平原耕地面源污染迁移轨迹及空间格局 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 258-266.
- [29] 周成, 赵亚玲, 任敏敏, 等. 黄河流域国家湿地公园时空分异、重心演化与驱动因素分析 [J]. 干旱区地理, 2024,

- 47(3): 506-514.
- [30] 陈秋计, 谢米米, 南丹丹, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的咸阳市生态系统碳储量时空演变与预测 [J]. 自然资源遥感, 2025, 37(5): 172-182.
- [31] 郑海岳, 王磊, 魏涛, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的淮南市土地覆盖模拟与碳储量评估 [J]. 环境科学, 2025, 46(8): 4754-4764.
- [32] 李璐, 张斌. 基于 FLUS-InVEST 模型的武汉市土地利用变化及碳储量经济价值估算 [J]. 环境科学, 2025, 46(9): 5777-5787.
- [33] 闫睿. 对重庆市新一轮退耕还林工程建设的思考 [J]. 国家林业和草原局管理干部学院学报, 2018, 17(2): 8-12, 18.
- [34] 尹珂, 廖思雨. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的三峡库区(重庆段)碳储量时空变化及预测 [J]. 长江科学院院报, 2024, 41(9): 60-69.
- [35] QIANNAN L, AINONG L, ZHIYUN O, et al. Spatial Distribution Characteristics of Biomass and Carbon Storage in Forest Vegetation in Chongqing Based on RS and GIS [J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2016, 15(4): 1381-1388.
- [36] ZHU K W, HE J, TIAN X S, et al. Analysis of Evolving Carbon Stock Trends and Influencing Factors in Chongqing under Future Scenarios [J]. Land, 2024, 13(4): 421.
- [37] BAI Y, OCHUODHO T O, YANG J. Impact of Land Use and Climate Change on Water-Related Ecosystem Services in Kentucky, USA [J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 51-64.
- [38] 苏永莉, 阎建忠, 周洪. 重庆市的森林转型: 时空格局与动态模拟 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(6): 82-91.
- [39] 虎帅, 张学儒, 官冬杰. 基于 InVEST 模型重庆市建设用地扩张的碳储量变化分析 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 323-331.
- [40] 中共中央国务院. 成渝地区双城经济圈建设规划纲要 [EB/OL]. (2021-10-20) [2025-04-22]. [https://www.gov.cn/xinwen/2021-10/21/content\\_5643875.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-10/21/content_5643875.htm).
- [41] 刘新智, 李心怡, 张鹏飞. 重庆中心城区和主城新区同城化水平评价及其影响因素研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(12): 97-109.
- [42] SHAO Z L, CHEN C Y, LIU Y L, et al. Impact of Land Use Change on Carbon Storage Based on FLUS-InVEST Model: A Case Study of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration, China [J]. Land, 2023, 12(8): 1531.

责任编辑 崔玉洁