

韩依纹, 万明暄, 方铁树, 等. 生态底线约束下的国土生态空间碳储量预测: 以襄阳市为例[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(3): 89-99.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.03.009

## 生态底线约束下的国土生态空间碳储量预测: 以襄阳市为例

韩依纹, 万明暄, 方铁树, 万敏

华中科技大学建筑与城市规划学院/湖北省城镇化工程技术研究中心, 武汉 430074

**摘要** 为探究生态底线约束下的国土生态空间碳储存功能的时空响应特点, 运用ArcGIS平台集合PLUS模型和InVEST-Carbon模型模拟并预测2000—2030年襄阳市生态空间碳储量变化及其空间特征。结果显示: 2000—2020年间襄阳市生态空间面积缩减, 预测到2030年在生态底线约束下的生态空间退化速度降低; 到2030年, 襄阳市碳储量由于生态空间变化相应转变, 栅格单元碳储量最大值约为18.47 kg, 主要分布在西部、东北和东南的林地中; 热点分析呈现“热点集中、冷点分散”的格局, 生态底线约束有助于优化襄阳市生态空间碳热点格局。

**关键词** 国土生态空间; 土地利用预测; 碳储量; 生态保护红线; 气候变化

**中图分类号** TU984.2; F301.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)03-0089-11

气候变化是当前全球面临的主要环境问题之一<sup>[1]</sup>。《京都议定书》《巴黎协定》《联合国气候变化框架公约》等国际协议均强调提升区域碳储存能力的重要性。我国提出力争在2030年前完成“碳达峰”, 争取2060年前实现“碳中和”的“双碳”战略<sup>[2]</sup>, 亟需多方落实“双碳”行动方案<sup>[3]</sup>。

国土生态空间是维持区域碳平衡进而实现“双碳”目标的重要保障和必要载体<sup>[4]</sup>。其中, 生态保护红线作为我国环境保护的一项重要制度创新, 是我国生态安全保障的底线。《关于加强生态保护红线管理的通知(试行)》([https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/20/content\\_5706169.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/20/content_5706169.htm))强调了需对此区域实行最为严格的管控和长期保护。当前关于生态保护红线的研究主要集中在勘界定标<sup>[5]</sup>、政策制定<sup>[6]</sup>、生态保护<sup>[7]</sup>和价值评定<sup>[8]</sup>等方面, 尽管在生境质量维持和自然资源利用等角度已有初步进展, 但“双碳”视角着眼不足, 相关研究仍需推进。

近年来, 针对城市碳储量预测的空间模型快速发展, 通常基于土地利用与覆被(land use and land cover, LULC)预测结合碳储量测算进行综合模拟。碳储量评价的方法具有尺度差异性, 主要包含实地

调查<sup>[9]</sup>、遥感反演<sup>[10]</sup>和模型模拟<sup>[11]</sup>等。其中, 相较于土壤剖面调查、样方调查等传统工作量大、周期长的碳储量调查方法, 模型模拟测算可操作性强、效率更高。较常使用的生态系统服务综合评估和权衡模型(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST)中的“Carbon”模块能借助遥感数据和地理信息平台测算多尺度场地的碳储量<sup>[12]</sup>。LULC的预测结果会直接影响碳储量, 已有土地利用预测模型在用地转化规则挖掘和动态变化模拟方面存在一定不足<sup>[13]</sup>, 从而影响结果精度, 而斑块生成土地利用变化模拟模型(patch-generating land use simulation, PLUS)应用新的用地扩张分析策略和多类种子生长机制, 提升了大尺度区域的LULC数据模拟精度<sup>[14]</sup>。

当前基于碳储量提升的LULC预测主要将自然发展<sup>[15]</sup>、城镇扩张<sup>[16]</sup>、耕地保护<sup>[17]</sup>和生态优先<sup>[18]</sup>作为模拟情景, 其中“生态优先情景”可通过调控目标用地增幅或限制地类转换实现<sup>[19]</sup>。然而, 调控过程较主观、缺乏实际政策支撑, 将生态保护红线作为约束条件有效介入模拟过程, 可为规划政策的制定提供更科学的指引。当前生态底线约束情景下的碳储

收稿日期: 2023-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008180; 52178038)

韩依纹, E-mail: hanyiwen@hust.edu.cn

通信作者: 万敏, E-mail: wanming1@sina.com

量预测模拟仅在武汉城市圈<sup>[20]</sup>和南京市<sup>[19]</sup>等地开展,其采用Markov-FLUS耦合模型模拟LULC变化情景,并运用InVEST模型定量研究碳储量,但预测结果缺乏验证。此外,结合ArcGIS工具的热点分析模型可以判读碳储存优势地类的空间聚集特点,得以明晰区域发展策略并对国土生态空间管控规划提供参考<sup>[21]</sup>。

本研究基于2000、2010和2020年的LULC数据,运用ArcGIS平台集合PLUS模型和InVEST-Carbon模型进行时空变化分析和预测模拟,旨在探究生态底线约束下国土生态空间碳储量变化及其空间特征,以期“双碳”导向下国土生态空间管控与规划实践提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

湖北省襄阳市(110°45'E~113°06'E,31°13'N~32°37'N)总面积约1.97万km<sup>2</sup>,属亚热带季风气候,

年平均气温15~16℃。地形西高东低(西部山地、中部岗地平原及东部低山丘陵),全市森林覆盖率达46%,湿地总面积为67.72 km<sup>2</sup>。得益于区域气候和生境多样性,襄阳市自然禀赋优越,为人居环境可持续发展创造了良好的基础。襄阳市作为华中地区重要的生态功能区域,当前颁布的相关文件多次强调要遵循国家生态红线政策、严守生态底线从而管控生态空间。本研究将山、水、林、湖、草主导的生态要素确定为研究对象,其中,生态保护红线面积为1757.33 km<sup>2</sup>,主要集中在南漳县(508.51 km<sup>2</sup>)、保康县(414.46 km<sup>2</sup>)和谷城县(382.99 km<sup>2</sup>),包含了30个自然保护地及9个水源地,如湖北五道峡国家级自然保护区、湖北南河国家级自然保护区和湖北襄阳岷山国家森林公园等(图1)。本研究中使用的襄阳市地图的底图来源于国家地理信息公共服务平台“天地图”的标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>),审图号为鄂S(2023)009号。

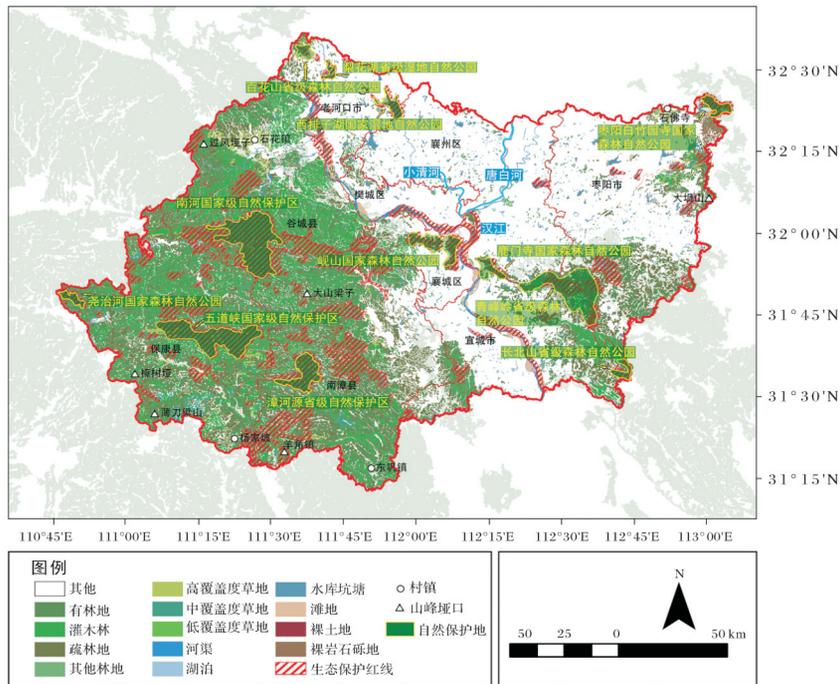


图1 研究区域及其生态空间地类  
Fig.1 Study area and LULC types

### 1.2 数据收集与处理

襄阳市行政边界和生态保护红线矢量数据源自襄阳市自然资源和规划局;2000、2010和2020年襄阳市LULC数据源自Landsat 30 m遥感影像,依据研究目的将LULC归纳为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6个一级地类和25个二级地类,在此

基础上选取生态空间范围,用于分析襄阳市碳储量历史转变;驱动因子数据用于预测模拟襄阳市2030年LULC,包括自然环境数据和社会经济数据。其中,高程数据从地理空间数据云([www.gscloud.cn](http://www.gscloud.cn))获取,坡度数据通过高程数据计算得到;年平均降水量、年平均气温、土壤侵蚀程度、人口和GDP数据来

自中国科学院资源环境与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 经剪裁后进行重采样处理; 铁路和公路数据来自 OpenStreetMap (<http://www.openstreetmap.org/>) 平台, 基于 ArcGIS 平台采用欧氏距离计算获得最近铁路、公路距离, 以上数据经处理后统一分辨率为 30 m×30 m。碳密度参数通过相关文献及 InVEST 手册提供的参考数据, 并结合襄阳市实际修正获得<sup>[22]</sup>。

### 1.3 研究方法

本研究首先基于 2000、2010 年数据运用 PLUS 模型模拟得到 2020 年 LULC 数据, 并与 2020 年实际数据进行精度验证, 从而证明驱动因子选择合理 (Kappa 系数 ≥ 75%)。然后将生态保护红线设定为底线约束条件, 基于 2010 和 2020 年数据预测得到 2030 年 LULC 并提取 4 个年份的生态空间, 随后运用 InVEST-Carbon 模型计算碳储量, 同时进行热点分析探究其空间特征 (图 2)。

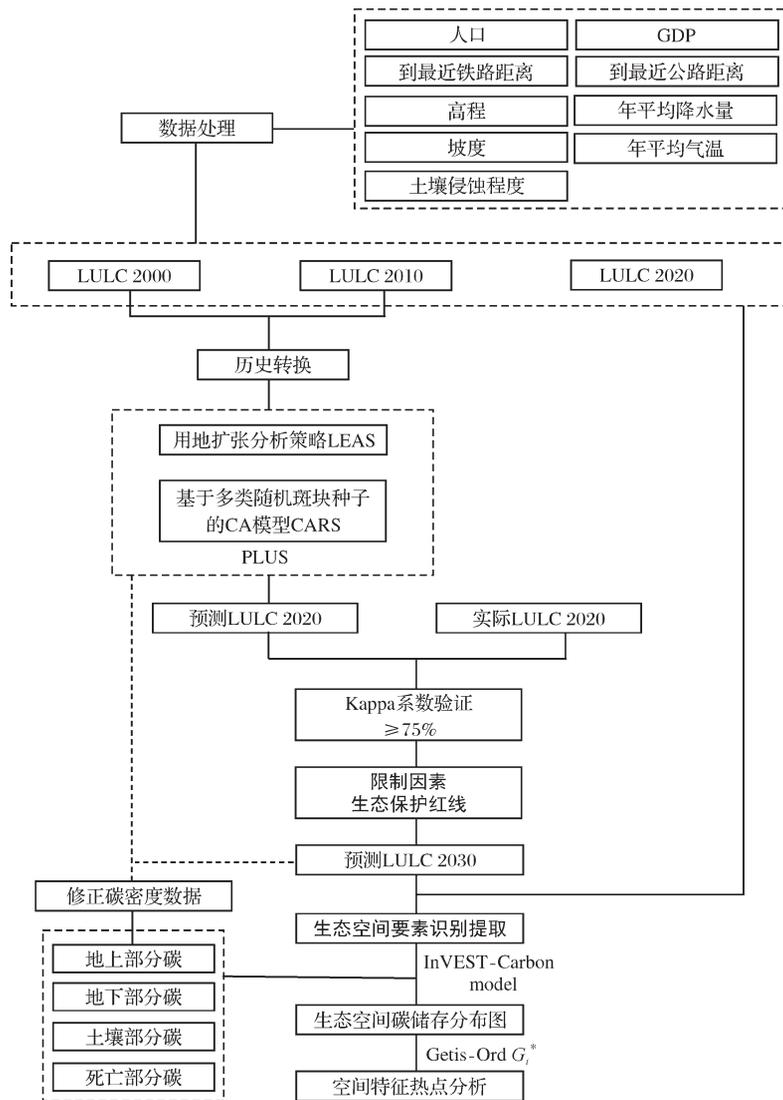


图 2 技术路径

Fig.2 Research framework

1) 基于 PLUS 模型的 LULC 预测模拟。PLUS 模型由中国地质大学主导研发, 包括用地扩张分析策略 (land expansion analysis strategy, LEAS) 和基于多类随机斑块种子的 CA 模型 (CA based on multiple random seeds, CARS) 2 个模块, 相对其他预测模型, PLUS 对各类 LULC 变化的影响因素解释性更好、模

拟结果精度更高<sup>[23]</sup>。本研究根据襄阳市实际情况及数据的可获取性, 从自然环境和社会经济 2 个方面选取高程、坡度、年平均降水量、年平均气温、土壤侵蚀程度、人口密度、GDP、到最近铁路距离、到最近公路距离 9 个驱动因子, 以 2000 和 2010 年数据为基础模拟 2020 年 LULC。首先, 通过 LEAS 模型分析用地

扩张,运用随机森林算法挖掘并获取各类用地的展概率和驱动因子的贡献率<sup>[24]</sup>,选择随机采样方式,采样默认率为0.01,mTry为9个,决策树为20,并行线程数量为4。其次,使用CARS模块在发展概率的约束下模拟斑块的自动生成,通过自适应惯性系数计算获取LULC变化综合概率,并结合随机斑块生成机制、过渡矩阵和阈值递减进行优化<sup>[25]</sup>,其中,邻域范围选取默认值3,斑块生成递减阈值的衰减系数设置为0.5,扩散系数为0.1,随机斑块种子的概率为0.0001。CARS模拟根据各LULC扩张面积占比确定领域权重。将2020年LULC模拟结果与实际2020年地类数据进行精度对比(Kappa系数高于0.75认为模拟有效),从而证实驱动因子选择的合理性<sup>[26]</sup>。在模拟精度满足要求的前提下,基于上一步的驱动因子和模拟设置,将生态保护红线作为转移限制因素以预测2030年的LULC。计算公式为:

$$P_{i,k(X)}^d = \frac{\sum_{n=1}^M I(h_n(X)=d)}{M} \quad (1)$$

式(1)中, $d$ 取值0或1, $k$ 为地类类型, $X$ 为由驱动因子组成的向量, $h_n(X)$ 为在决策树为 $n$ 时得到的地类预测类型, $P_{i,k(X)}^d$ 为空间单元 $i$ 处 $k$ 地类面积增长的概率, $I(\cdot)$ 为决策树的指示函数。

$$D_k^t = \begin{cases} D_k^{t-1} & (|G_k^{t-1}| \leq |G_k^{t-2}|) \\ D_k^{t-1} \times \frac{G_k^{t-2}}{G_k^{t-1}} & (0 > G_k^{t-2} > G_k^{t-1}) \\ D_k^{t-1} \times \frac{G_k^{t-1}}{G_k^{t-2}} & (G_k^{t-1} > G_k^{t-2} > 0) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $D_k^t$ 为 $t$ 时刻地类 $k$ 的惯性系数, $G_k^{t-1}$ 为 $t-1$ 时刻用地需求与实际数量之间的差异。

$$P(O)_{i,k}^{d=1,t} = P_{i,k}^d \times \Omega_{i,k}^t \times D_k^t \quad (3)$$

$$P(T)_{i,k}^{d=1,t} = \begin{cases} P_{i,k}^{d=1} \times (r \times \mu_k) \times D_k^t & (\Omega_{i,k}^t = 0, r < P_{i,k}^{d=1}) \\ P_{i,k}^{d=1} \times \Omega_{i,k}^t \times D_k^t & \end{cases} \quad (4)$$

式(3)~(4)中, $P(O)_{i,k}^{d=1,t}$ 为空间单元 $i$ 处在 $t$ 时刻向地类 $k$ 转变的综合概率; $P_{i,k}^d$ 为空间单元 $i$ 处地类向 $k$ 发展的适宜性概率; $\Omega_{i,k}^t$ 为 $t$ 时刻地类 $k$ 在单元空间 $i$ 处的权重; $D_k^t$ 为自适应驱动系数; $P(T)_{i,k}^{d=1,t}$ 为引入随机斑块生成机制后空间单元 $i$ 处在 $t$ 时刻向地类 $k$ 转变的概率; $r$ 为0~1之间的随机值; $\mu_k$ 为新的地类斑块生成阈值。

$$\begin{cases} P_{i,c}^{d=1} > \tau, M(T)_{k,c} = 1 \\ P_{i,c}^{d=1} \leq \tau, M(T)_{k,c} = 0 \end{cases} \quad \tau = \delta^t \times R_1 \quad (5)$$

式(5)中, $\delta$ 为衰减阈值 $\tau$ 的衰减系数; $R_1$ 是均值为1的正态分布; $M(T)_{k,c}$ 为过渡转移矩阵,决定地类 $k$ 是否可以向地类 $c$ 转变。

2)基于InVEST的碳储量测算。本研究使用InVEST中的Carbon模块进行碳储量测算,包括地上生物量中的碳、地下生物量中的碳、土壤中的碳和死亡有机物中的碳。模型计算公式为:

$$C_i = C_{i,above} + C_{i,below} + C_{i,soil} + C_{i,dead} \quad (6)$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \quad (7)$$

式(6)~(7)中, $C_i$ 为地类 $i$ 的土壤及生物量总碳密度; $C_{i,above}$ 为地类 $i$ 的地上生物量碳密度, $C_{i,below}$ 为地类 $i$ 的地下生物量碳密度, $C_{i,soil}$ 为地类 $i$ 的0~30cm深土壤有机质碳密度, $C_{i,dead}$ 为地类 $i$ 的枯落物有机质碳密度,以上碳密度单位为 $mg/hm^2$ ; $C_{total}$ 为总碳储量,t; $S_i$ 为地类 $i$ 总面积, $hm^2$ , $n$ 为地类数量(表1)。

表1 各类LULC的碳密度值  
Table 1 The carbon pools of LULC

一级LULC First level	二级LULC Second level	地上部分碳密度 Above ground biomass	地下部分碳密度 Below ground biomass	土壤有机质 碳密度 Soil	枯落物有机 质碳密度 Dead organic matter
林地 Forest land	有林地 Forest land (Tree canopy density ≥ 20%)	49.60	24.97	128.67	1.99
	灌木林 Shrub land	8.10	1.62	91.70	3.48
	疏林地 Open forest land (10% ≤ Tree canopy density < 20%)	8.10	1.62	91.70	3.48
	其他林地 Other forest land	35.03	7.01	142.58	3.75
草地 Grass	高覆盖度草地 High coverage grassland	1.03	2.61	62.90	0.24
	中覆盖度草地 Medium coverage grassland	1.30	0.26	19.30	0.00
	低覆盖度草地 Low coverage grassland	1.30	0.26	19.30	0.00
水域 Water	河渠 Rivers				
	湖泊 Lakes	2.29	0.00	17.16	0.00
	水库坑塘 Ponds				
	滩地 Shallows				

3) 基于 ArcGIS 平台的碳热点空间分析。ArcGIS 中的热点分析用于探究各项特征值分布的聚集程度,如果区域中某一要素值为高值且被高值要素包围,则该位置可认为是统计学上的显著性热点,反之,低值聚集则为冷点区域<sup>[27]</sup>,通常采用 Getis-Ord  $G_i^*$  探查碳储量高值或者低值在空间上发生聚类的位置<sup>[28]</sup>。Getis-Ord  $G_i^*$  计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_j^n W_{i,j} x_j}{\sum_j^n x_j} \quad (8)$$

式(8)中,  $W_{i,j}$  为斑块  $i$  与斑块  $j$  之间的空间权重矩阵,  $x_j$  为斑块  $j$  的属性值,  $n$  为样本点总数。

## 2 结果与分析

### 2.1 2000—2030 年生态空间时空变化及预测

1) 生态空间用地总体特征与变化。2000 年到 2020 年生态空间总面积先上升后下降,总体保持稳定,生态空间要素分布不均,呈现西南密集、东部散

布、北部稀缺的格局(图 3)。其中,林地是生态空间面积最大的要素,主要分布在西部的南漳县、保康县和谷城县,其面积降低最显著,退化区域集中在襄州区、襄城区和枣阳市的中部和东部;而水域主要分布在枣阳市、襄州区、宜城市,其面积变化最剧烈,反映出襄阳市水域生态敏感性较强。同时运用 PLUS 模型模拟得到的 2020 年 LULC 数据与实际数据进行 Kappa 精度验证后系数为 0.948,证实驱动因子选择合理。预测 2030 襄阳市生态空间总体面积略微减少。

2) 阶段性生态空间用地变化特征。图 4 显示,2000—2010 年期间生态空间总体面积略微增加 76.22 km<sup>2</sup>。其中,林地总面积下降 29.09 km<sup>2</sup>,仅其他林地要素面积上升;水域面积增加较多(105.81 km<sup>2</sup>),主要为河渠、水库坑塘和滩地。此时期水利工程兴建迫使自然生境被侵占,同时各区县也相继实施了一系列植树造林政策,例如《襄城区石漠化土地

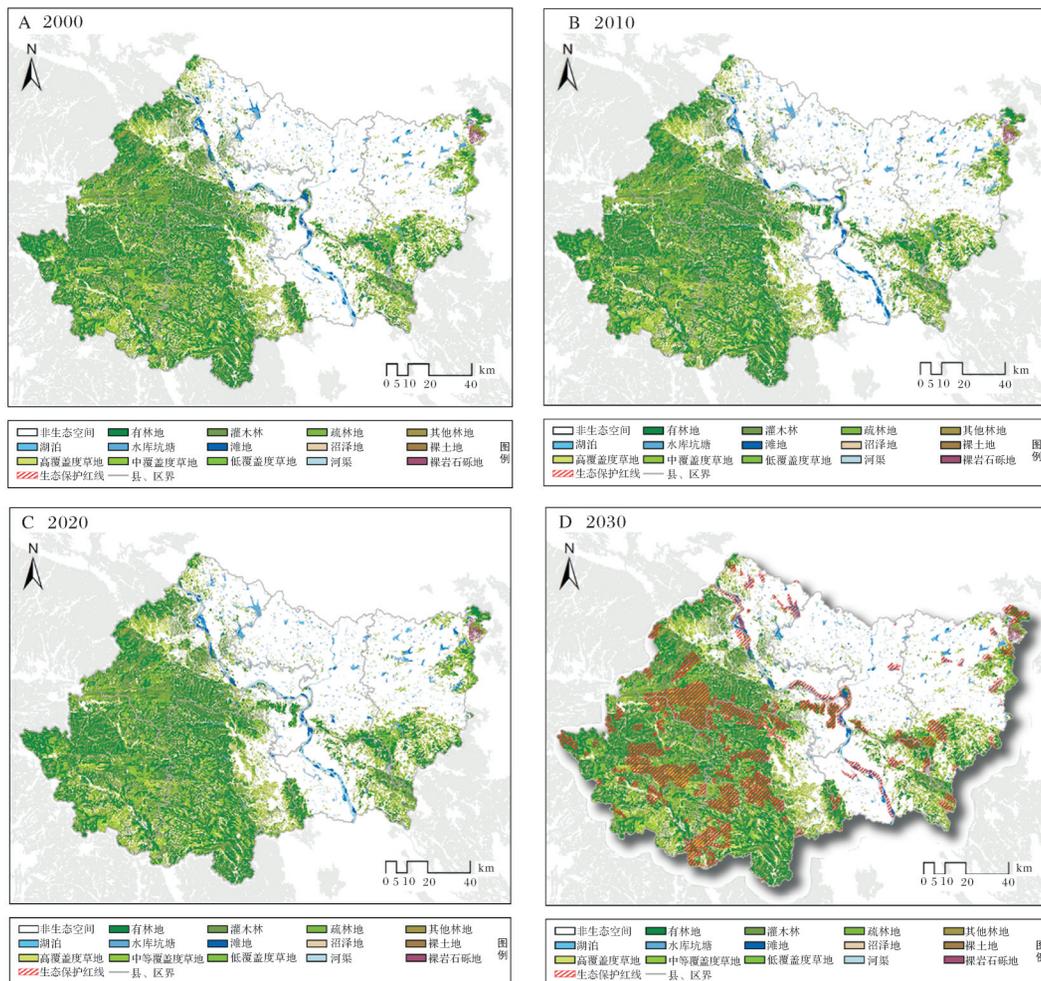
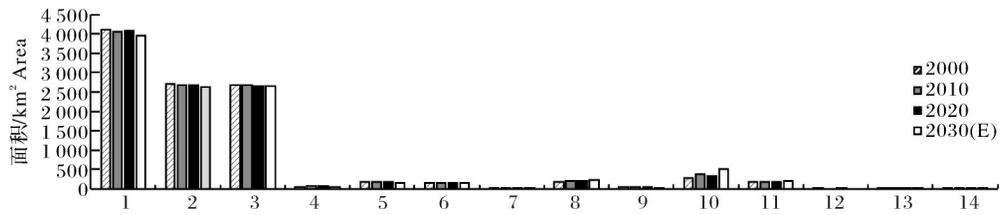


图3 2000,2010,2020年襄阳市生态空间用地变化及2030年预测

Fig.3 Changes and projections of ecological spaces' LULC in Xiangyang City in 2000,2010,2020, and 2030



1. 有林地 Forest land; 2. 灌木林 Shrub land; 3. 疏林地 Open forest land; 4. 其他林地 Other forest land; 5. 高覆盖度草地 High coverage grassland; 6. 中覆盖度草地 Medium coverage grassland; 7. 低覆盖度草地 Low coverage grassland; 8. 河渠 Rivers; 9. 湖泊 Lakes; 10. 水库坑塘 Ponds; 11. 滩地 Shallows; 12. 沼泽地 Marshland; 13. 裸土地 Bare land; 14. 裸岩石砾地 Rocky land.

图4 2000, 2010, 2020 以及 2030 年襄阳市生态空间要素面积变化

Fig.4 Changes in the area of elements of ecological spaces in Xiangyang City in 2000, 2010, 2020, and 2030

综合治理规划(2006)》和《南漳县岩溶地区石漠化综合治理规划(2006)》等。2010—2020年期间生态空间面积减少了72.65 km<sup>2</sup>,其中水域面积缩减最多(53.59 km<sup>2</sup>)。同时,林地面积总体略有缩减(16.39 km<sup>2</sup>),但对碳储量起到重要作用的有林地扩大了15.73 km<sup>2</sup>。预测到2030年,襄阳市生态空间面积略下降4.09 km<sup>2</sup>,除疏林地外的其余类型林地均有萎缩,草地面积轻微下降,但各类水域显著增加,生态保护红线约束下的区域生态系统退化速度降低。

## 2.2 2000—2030年生态空间碳储量时空变化及预测

1)碳储量总体特征与变化。襄阳市生态空间碳储量呈现下降趋势并预计持续至2030年,高值区域主要分布在西部、东北和东南的林地中。2000—2030年间,栅格单元碳储量最大值约为18.47 kg (30 m×30 m),主要分布在海拔较高的山地林区,由于此区域较少受到人类活动影响,自然生态环境维持较好;低值主要集中在林地边缘和北部耕地等受干扰较多的区域。森林质量较高的谷城县、保康县、南漳县、枣阳市东南部以及宜城市东部聚集为连片高值区;中部地区整体较低但散布一些孤岛状高值区,主要包含各类森林公园、湿地公园和自然保护区。

2)阶段性生态空间碳储量变化特征。2000—2010年间,生态空间碳储量下降 $2.5 \times 10^5$  t,主要归因于有林地和灌木林地面积的缩减;2010—2020年间,襄阳市城市化进程持续推进,得益于《襄阳市国家森林城市建设总体规划(2010—2020)》等政策相继出台,生态空间碳储量略下降 $1.2 \times 10^5$  t;预测到2030年,生态空间碳储量为 $1.40 \times 10^8$  t,降低区域主要集中在青峰岭、保康县中部的山区林地和谷城县西北部的林地边缘。

## 2.3 2000—2030年生态空间碳热点时空变化及预测

1)碳热点空间分布特征与变化。襄阳市碳热点分布总体呈现“热点集中、冷点分散”的格局,其中强热点占比最高,但生态保护红线仅覆盖部分强热点区域(图5)。热点区域主要集中在西部的谷城县、保康县和南漳县;中部和东部的少量热点主要集中在森林公园、湿地公园和自然保护区,如青峰岭省级森林自然公园和白竹园寺国家森林公园等。冷点区域主要散布在老河口市北部、保康县西部、枣阳市和宜城市南部、樊城区和襄州区北部,这些区域人类活动干扰较强,生态空间被城镇或农田包围,碳储存能力强的天然植被群落较少,形成冷点散布格局。考虑到植被群落类别和丰富度是影响生态空间碳储存能力的重要因素,冷点区域的植被群落应修复和优化,而热点区域可以视为碳储存的重点保护区域,采取针对措施防止生境退化。

2)阶段性碳热点空间分布变化特征。襄阳市碳热点空间格局保持稳定,生态保护红线约束可以强化碳热点的聚集度(表2)。2000—2010年间,襄阳市西部碳热点区域有所扩大,保康省级森林自然公园和南河国家级自然保护区东部等区域热值升高,保康尧治河森林自然公园区域冷值下降。2010—2020年间,相对上一阶段碳热点空间分布差异性较大,香水河省级森林自然公园区域碳热点持续增强,枣阳青峰岭省级森林自然公园和罗桥水库等区域进一步加热(表3)。襄阳市东部热点热力下降,南部和中部上升且面积扩大,其余区域基本稳定。冷点区域仅汉江沿岸、保康县局地 and 宜城市局地外略有变化。预测2030年在生态底线约束下“高-高”碳热点区域面积显著增大并向中心城区方向绵延,其中强热点区域提升至31.29%。

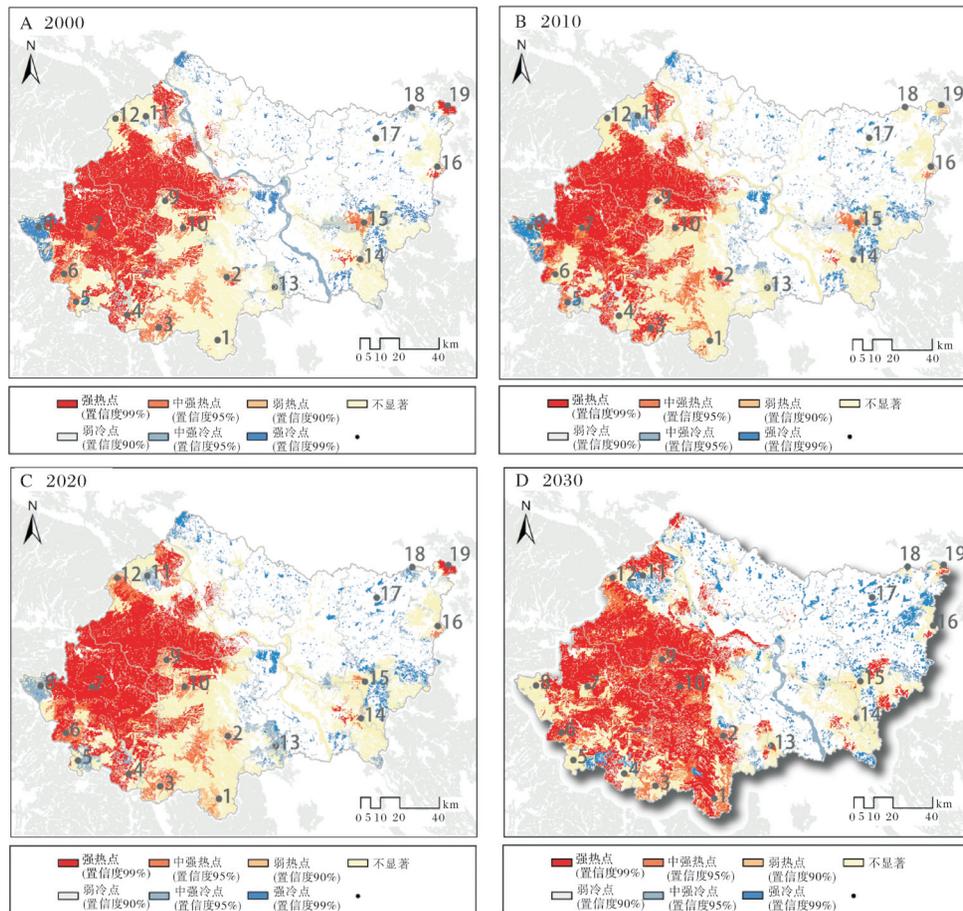


图 5 2000,2010,2020 以及 2030 年襄阳市生态空间碳热点变化

Fig.5 Changes in carbon hotspot of ecological spaces in Xiangyang City in 2000 ,2010,2020 ,and 2030

表 2 2000,2010,2020 以及 2030 年襄阳市热点面积统计

Table 2 Statistics of hotspot areas in Xiangyang City in 2000, 2010, 2020, and 2030

级别 Level	2000		2010		2020		2030	
	面积/ km <sup>2</sup> Area	占当年生态空 间 面积比例/% Percentage of ecological space area in the year	面积/ km <sup>2</sup> Area	占当年生态 空间面积 比例/% Percentage of ecological space area in the year	面积/ km <sup>2</sup> Area	占当年生态 空间面积 比例/% Percentage of ecological space area in the year	面积/ km <sup>2</sup> Area	占当年生态 空间面积 比例/% Percentage of eco- logical space area in the year
弱热点(置信度90%) Weak hotspot(90% confidence)	309.26	2.93	379.82	3.57	230.37	2.18	233.63	2.21
中强热点(置信度95%) Medium hotspot(95% confidence)	723.94	6.85	755.69	7.10	710.74	6.72	861.57	8.15
强热点(置信度99%) Strong hotspot(99% confidence)	3 856.58	36.48	4 162.03	39.09	3 962.83	37.47	5 202.19	49.21
总计 Sum	4 889.78	46.25	5 297.55	49.75	4 903.93	46.37	6 297.38	59.57

### 3 讨论

碳储存对全球气候变化具有重要作用,其中 LULC 是影响陆地碳储量的关键因素之一,生态保护红线作为国土空间的生态约束底线,可限制 LULC

变化进而维持区域碳储存能力。本研究基于 2000、2010 和 2020 年 LULC 数据,通过 PLUS 模型模拟 2030 年数据,并运用 InVEST 模型和热点分析对襄阳市生态空间碳储量及其空间特征进行探究。结果显示:2000—2020 年间襄阳市生态空间面积缩减,预

表3 2000—2030年间碳热、冷点地区变化分析

Table 3 Analysis of regional changes in carbon hotspot and cold spots from 2000 to 2030

编号 No.	名称 Name	行政区划 District	2000— 2010	2010— 2020	2020— 2030
01	东巩镇 Donggong Town	南漳县 Nanzhang	↑	↓	↑
02	香水河省级森林自然公园 Xiangshuihe Provincial Forest Park	南漳县 Nanzhang	↑	↑	↑
03	羊角山 Yangjiao Mountain	南漳县 Nanzhang	-	↑	↑
04	杨家坡 Yangjiapo	南漳县 Nanzhang	-	↓	↑
05	薄刀梁山 Bodaoliang Mountain	保康县 Baokang	↓	↑	↑
06	樟树垭 Zhangshuya	保康县 Baokang	-	↓	↑
07	保康省级森林自然公园 Baokang Provincial Forest Park	保康县 Baokang	↑	↓	↓
08	保康尧治河森林自然公园 Baokang Yaozhihe Forest Park	保康县 Baokang	↑	-	↑
09	南河国家级自然保护区东部 Eastern part of Nanhe National Nature Reserve	谷城县 Gucheng	↑	↓	-
10	大山梁子 Dashanliangzi	南漳县 Nanzhang	-	↑	↑
11	石花镇 Shihua Town	谷城县 Gucheng	↓	↓	↑
12	过风垭子 Guofengyazi	谷城县 Gucheng	↑	↓	↑
13	宜城金牛山省级森林自然公园 Yicheng Jinniushan Provincial Forest Park	宜城市 Yicheng	↓	↑	↑
14	宜城莺河省级湿地自然公园 Yicheng Yinghe Provincial Wetland Park	宜城市 Yicheng	-	↓	↑
15	枣阳青峰岭省级森林自然公园 Zaoyang Qingfengling Provincial Forest Park	枣阳市 Zaoyang	↓	↑	↑
16	大坝山 Daba Mountain	枣阳市 Zaoyang	↓	-	↑
17	罗田水库 Luotian Reservoir	枣阳市 Zaoyang	↓	↑	↓
18	石佛寺 Shifo Temple	枣阳市 Zaoyang	↓	↑	-
19	枣阳白竹园寺国家森林公园 Zaoyang Baizhuyuansi National Forest Park	枣阳市 Zaoyang	-	↓	↑

注: ↑代表热值升高或者冷值下降,说明此地及周边碳储存能力整体升高; ↓代表热值降低或者冷值升高,说明此地及周边碳储存能力整体下降; -表示无明显变化。Note: ↑ represents an increase in heating value or a decrease in cooling value, indicating an overall increase in carbon storage capacity in and around the site; and ↓ represents a decrease in heating value or an increase in cooling value, indicating an overall decrease in carbon storage capacity in and around the site; - represents no significant changes.

测到2030年在生态底线约束下的生态空间退化速度降低;到2030年,襄阳市碳储量由于生态空间变化相应转变,栅格单元碳储量最大值约为18.47 kg,主要分布在西部、东北和东南的林地中;生态底线约束有助于优化襄阳市生态空间碳热点格局。据此提出以下三点对策:

1) 优化重点区域生态空间占比,提升高碳储生态要素质量。本研究预测生态空间中固碳能力较强的LULC类别呈现退化趋势,尽管其总面积变化不大,但仍对区域碳储量影响较大。然而,当前我国各地侧重于保护生态敏感性或生境质量较高的区域,对生态要素固碳能力关注不足。其中,林地是生态空间碳储存的关键要素<sup>[29]</sup>,本研究结果也同样显示高碳储量区域主要集中在襄阳市西部山区,因此在生态空间管控规划中,宜将碳储存能力专项评估纳入编制过程。另外,襄阳市的森林资源的林木结构有待进一步优化,尽管其森林资源较为丰富,但多为灌木、杂木和次生林,制约其区域碳储存效能提升。同时,当地政府已开展了系列举措旨在恢复和保护优质林地资源,例如《关于绿满襄阳再提升行动的实

施意见》《关于开展“千村万树”行动推进森林乡村创建工作的通知》等,这为襄阳市生态空间碳储存效能提升奠定基础。

2) 保护固碳高热点区域,促进生态底线动态调控。热点区域对维持碳储量稳定有重要作用<sup>[30]</sup>,然而当前生态保护红线划定过程的“双碳”视角着眼不足,主要参考生物多样性保护、水资源保护、洪水缓解、土壤保护和沙尘暴防治5项生态系统服务指标。已有学者提出将二氧化碳协同控制纳入生态空间“三线一单”的管控中,并完成碳储存适宜区及碳热点判定以优化生态保护红线范畴<sup>[31]</sup>,相关修订路径仍有待探索,以推进“双碳”导向的生态底线动态调控。

3) 重视碳储量研究的实践传导,加强数字技术支撑体系建设。目前我国正处于社会经济新常态发展阶段,高效合理的国土空间规划和管控策略是应对气候变化的途径之一。碳储量评估可为地方生态系统生产总值(gross ecosystem product, GEP)核算、自然资源和生态效益评估等提供科学支持<sup>[32]</sup>。虽然上海市、武汉市和深圳市等地的生态空间专项规划

已经陆续发布,但其中将碳储量评估结果纳入规划决策仍有待补充。同时,大数据时代背景下,应建设碳测算开源平台、开展生态系统碳库调查和动态监测以及完善信息共享机制,从而为区域碳储量评估和增汇潜力探究提供数字技术保障。

然而,本研究尚存在一定技术局限性。模拟过程基于多源空间数据,其预测结果具有一定误差;同时,InVEST模型中碳密度参数基于前人研究确定,虽然选取了与本研究区条件较相似的研究区数据,但只考虑静态而忽略碳循环和不同碳库间的动态转化问题,与实际碳储量值会有一些差异,在未来采用该模型时可配合实地调研从而进一步提高精度。

### 参考文献References

- [1] 徐冠华,刘琦岩,罗晖,等.后疫情时代全球气候变化的应对与抉择[J].遥感学报,2021,25(5):1037-1042.XU G H,LIU Q Y,LUO H,et al.Responses and choices of global climate change in the post-epidemic era[J].National remote sensing bulletin,2021,25(5):1037-1042(in Chinese with English abstract).
- [2] 付允,马永欢,刘怡君,等.低碳经济的发展模式研究[J].中国人口·资源与环境,2008,18(3):14-19.FU Y,MA Y H,LIU Y J,et al.Development patterns of low carbon economy[J].China population,resources and environment,2008,18(3):14-19(in Chinese with English abstract).
- [3] 邵继中,张晓思,郭文娟,等.“双碳”目标背景下的风景园林行动:国际风景园林师联合会亚太地区气候变化工作组专访[J].华中农业大学学报,2023,42(4):1-6.SHAO J Z,ZHANG X S,GUO W J,et al.Landscape architecture action under goal of carbon peak and neutrality:an exclusive interview with International Federation of Landscape Architects Asia Pacific Region Climate Change Working Group[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2023,42(4):1-6(in Chinese with English abstract).
- [4] 王世豪,黄麟,徐新良,等.特大城市群生态空间及其生态承载状态的时空分异[J].地理学报,2022,77(1):164-181.WANG S H,HUANG L,XU X L,et al.Spatio-temporal variation characteristics of ecological space and its ecological carrying status in mega-urban agglomerations[J].Acta geographica sinica,2022,77(1):164-181(in Chinese with English abstract).
- [5] 高林营,武萌华,周智勇.一种顾及多因子的生态保护红线勘界定标自动化预标注方法[J].测绘通报,2023(3):160-164.GAO L Y,WU M H,ZHOU Z Y.A multi-factor automatic pre-marking method for ecological protection red line survey and demarcation standards[J].Bulletin of surveying and mapping,2023(3):160-164(in Chinese with English abstract).
- [6] 姚佳,王敏,黄宇驰,等.我国生态保护红线三维制度体系:以宁德市为例[J].生态学报,2015,35(20):6848-6856.YAO J,WANG M,HUANG Y C,et al.Three-dimensional frame exploration of the ecological protection red line in China:a case study of the Ningde region[J].Acta ecologica sinica,2015,35(20):6848-6856(in Chinese with English abstract).
- [7] 马晓武,徐昔保.区域尺度生态保护红线连通性优化与管控:以长三角为例[J].自然资源学报,2022,37(12):3088-3101.MA X W,XU X B.Optimization and management of the connectivity of ecological red lines at regional scale:a case study of Yangtze River Delta[J].Journal of natural resources,2022,37(12):3088-3101(in Chinese with English abstract).
- [8] 史雪威,陈绪慧,蔡明勇,等.宁夏全区及生态保护红线生态系统服务价值变化评估[J].地球信息科学学报,2023,25(5):999-1011.SHI X W,CHEN X H,CAI M Y,et al.Evaluation of changes in ecosystem services in ecological conservation red line and the entire area of Ningxia[J].Journal of geoinformation science,2023,25(5):999-1011(in Chinese with English abstract).
- [9] 荣培君,秦耀辰,王伟.河南省城镇化发展演变与碳排放效应研究[J].河南大学学报(自然科学版),2016,46(5):514-521.RONG P J,QIN Y C,WANG W.Research on the development and evolution of urbanization and carbon emissions effect in Henan Province[J].Journal of Henan University (natural science edition),2016,46(5):514-521(in Chinese with English abstract).
- [10] FU Y C,LU X Y,ZHAO Y L,et al.Assessment impacts of weather and land use/land cover (LULC) change on urban vegetation net primary productivity (NPP):a case study in Guangzhou,China[J].Remote sensing,2013,5(8):4125-4144.
- [11] NELSON E,SANDER H,HAWTHORNE P,et al.Projecting global land-use change and its effect on ecosystem service provision and biodiversity with simple models[J/OL].PLoS One,2010,5(12):e14327[2023-03-20].https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014327.
- [12] WANG C W,LUO J J,QING F,et al.Analysis of the driving force of spatial and temporal differentiation of carbon storage in Taihang Mountains based on InVEST model[J/OL].Applied sciences,2022,12(20):10662[2023-03-20].https://doi.org/10.3390/app122010662.
- [13] 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.
- [14] 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/OL].Remote sensing,2022,14(10):2330[2023-03-20].https://doi.org/10.3390/rs14102330.

- [15] 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/OL].农业资源与环境学报:1-18[2023-03-20].<https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0249>. WANG Z, WANG B, ZHANG Y F, et al. Dynamic simulation of multi-scenario land use change and carbon storage assessment in Hohhot City based on PLUS-InVEST model[J/OL]. Journal of agricultural resources and environment, 2023, 1-18 [2023-03-20]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0249> (in Chinese with English abstract).
- [16] 武爱彬,陈辅国,赵艳霞,等.京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响[J/OL].环境科学:1-20 [2023-03-20]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202305221>. WU A B, CHEN F G, ZHAO Y X, et al. Multi-scenario simulation of construction land expansion and its impact on ecosystem carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration [J/OL]. Environmental science, 1-20 [2023-03-20]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202305221> (in Chinese with English abstract).
- [17] 郭天,王之昱.基于LUCC的南京市生态系统碳储量时空演变预测及多情景模拟分析[J].湖北农业科学,2022,61(6):33-40. GUO T, WANG Z Y. Prediction and multi-scenario simulation analysis of the temporal and spatial evolution of ecosystem carbon storage in Nanjing based on LUCC [J]. Hubei agricultural sciences, 2022, 61(6): 33-40 (in Chinese with English abstract).
- [18] 邹桃红,陈鹏,刘家福,等.不同土地利用情景下四平市生态系统碳储量时空演变[J].中国环境科学,2023,43(10):5508-5518. ZOU T H, CHEN P, LIU J F, et al. Spatio-temporal dynamics of territorial ecosystem carbon storage under different land use scenarios in Siping City [J]. China environmental science, 2023, 43(10): 5508-5518 (in Chinese with English abstract).
- [19] 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):4052-4065. LIU Y, ZHANG J, ZHOU D M, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model [J]. Acta ecologica sinica, 2021, 41(10): 4052-4065 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张斌,李璐,夏秋月,等.“三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响:以武汉城市圈为例[J].生态学报,2022,42(6):2265-2280. ZHANG B, LI L, XIA Q Y, et al. Land use change and its impact on carbon storage under the constraints of “Three lines”: a case study of Wuhan City circle [J]. Acta ecologica sinica, 2022, 42(6): 2265-2280 (in Chinese with English abstract).
- [21] 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其预测:以广东省为例[J].中国环境科学,2022,42(10):4827-4839. LIN T, YANG M Z, WU D F, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: a case study in Guangdong Province [J]. China environmental science, 2022, 42(10): 4827-4839 (in Chinese with English abstract).
- [22] 柯新利,唐兰萍.城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响:以湖北省为例[J].生态学报,2019,39(2):672-683. KE X L, TANG L P. Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei Province, China [J]. Acta ecologica sinica, 2019, 39(2): 672-683 (in Chinese with English abstract).
- [23] 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/OL]. Computers, environment and urban systems, 2021, 85: 101569 [2023-03-20]. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569>.
- [24] 张大川,刘小平,姚尧,等.基于随机森林CA的东莞市多类土地利用变化模拟[J].地理与地理信息科学,2016,32(5):29-36. ZHANG D C, LIU X P, YAO Y, et al. Simulating spatio-temporal change of multiple land use types in Dongguan by using random forest based on cellular automata [J]. Geography and geo-information science, 2016, 32(5): 29-36 (in Chinese with English abstract).
- [25] 胡丰,张艳,郭宇,等.基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J].干旱区地理,2022,45(4):1125-1136. HU F, ZHANG Y, GUO Y, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions [J]. Arid land geography, 2022, 45(4): 1125-1136 (in Chinese with English abstract).
- [26] EASTMAN J R. IDRISI andes guide to GIS and image processing [M]. Worcester, MA: Clark University, 2006.
- [27] LU Z B, SONG Q A, ZHAO J Y. Evolution of landscape ecological risk and identification of critical areas in the Yellow River source area based on LUCC [J/OL]. Sustainability, 2023, 15(12): 9749 [2023-03-20]. <https://doi.org/10.3390/su15129749>.
- [28] 钟亮,林媚珍,周汝波.基于InVEST模型的佛山市生态系统服务空间格局分析[J].生态科学,2020,39(5):16-25. ZHONG L, LIN M Z, ZHOU R B. Analysis on the spatial pattern of ecosystem service in Foshan City based on InVEST Model [J]. Ecological science, 2020, 39(5): 16-25 (in Chinese with English abstract).
- [29] FENG Y J, CHEN S R, TONG X H, et al. Modeling changes in China's 2000-2030 carbon stock caused by land use change [J/OL]. Journal of cleaner production, 2020, 252: 119659 [2023-03-20]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119659>.
- [30] 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): 446-459. ZHU W B, ZHANG J J, CUI Y P, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: a case study in Qihe River Basin[J]. Acta geographica sinica, 2019, 74(3): 446-459 (in Chinese with English abstract).
- [31] YU L, GUO X Y, QIN C B, et al. Integrating synergistic control of pollutants and carbon dioxide into “Three Lines and One Permit” in China[J/OL]. Environmental impact assessment review, 2022, 97: 106908[2023-03-20]. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106908>.
- [32] 邓娇娇, 常璐, 张月, 等. 福州市生态系统生产总值核算[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3835-3844. DENG J J, CHANG L, ZHANG Y, et al. Accounting of gross ecosystem product in Fuzhou City, China [J]. Chinese journal of applied ecology, 2021, 32(11): 3835-3844 (in Chinese with English abstract).

## Predicting carbon storage of ecological space under constraints of ecological bottom line: taking Xiangyang City as an example

HAN Yiwen, WAN Mingxuan, FANG Tieshu, WAN Min

*College of Architecture & Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology/  
Hubei Engineering and Technology Center of Urbanization, Wuhan 430074, China*

**Abstract** Ecological space is an important vehicle for maintaining regional carbon balance and securing carbon storage, and the redline area of ecological protection is an important part of ecological space. This article aimed at studying the spatial and temporal response of the carbon storage of the ecological space under the constraints of the ecological bottom line. The ArcGIS platform was used to integrate the PLUS model and the InVEST-Carbon model to predict and simulate the changes in carbon storage of ecological space and its spatial characteristics in Xiangyang City, Hubei Province, China, from 2000 to 2030. The results showed that the area of ecological space in Xiangyang City decreased between 2000 and 2020. It is predicted that the degradation rate of ecological space will decrease by 2030 under the constraints of the ecological bottom line. By 2030, the carbon storage in Xiangyang City will undergo a corresponding transformation due to changes in ecological space. The maximum carbon storage per grid unit is about 18.47 kg, mainly distributed in the forest land in the west, northeast, and southeast. The hotspot analysis presents a pattern of “concentrated hotspot and scattered cold spots”. The constraint of ecological bottom line helps to optimize the pattern of carbon hotspot in the ecological space of Xiangyang City. It will provide scientific guidance for implementing “carbon peaking and carbon neutrality” strategies and promoting low-carbon planning in similar regions.

**Keywords** national ecological space; land use prediction; carbon storage; ecological redline; climate changes

(责任编辑: 陆文昌)