

面向碳中和的区域土地利用变化碳效应 时空模拟与优化研究

何亚莉

(安徽省第一测绘院,安徽合肥 230001)

摘要:针对生态功能区差异显著区域的碳效应时空异质性解析不足问题,本研究以巢湖流域为典型案例,集成多源遥感数据与 GIS 技术,构建“时空模拟-效应评估-优化策略”研究框架。基于 2001-2021 年土地利用时空模拟($Kappa>0.85$),量化建设用地扩张导致碳储量减少 12.7%与林地恢复使其增加 8.3%的动态平衡机制。空间异质性分析表明:城镇发展区碳排放强度(58.7Mg C/ha)占流域总量 67.5%,净碳效应-53.5Mg C/ha;森林保育区碳汇强度达 148.5Mg C/ha,面积占比 18.4%却贡献流域碳汇总量的 82.3%。据此提出多尺度优化策略:城镇区通过立体绿化和低碳准入标准将碳吸收强度提升至 8.0Mg C/ha;农业区采用保护性耕作使净碳效应由-1.2Mg C/ha 转为正值;生态区通过高固碳树种补植提升碳密度至 165Mg C/ha。研究成果为流域尺度“三生空间”碳平衡优化提供科学范式,支撑碳中和目标的精准落地。

关键词:碳中和;土地利用变化;碳效应;时空模拟;优化策略

中图分类号:F301.2

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)08-0074-9

0 引言

随着全球气候变化加剧,土地利用变化作为陆地生态系统碳循环的重要驱动因素,已成为《IPCC 国家温室气体清单指南》界定的关键碳排放源之一^[1]。国外学者较早关注到土地利用变化的碳效应,如美国通过 Landsat 遥感数据长期监测东北部森林砍伐的碳损失^[2],欧盟基于生态系统模型提出碳中性土地利用规划框架^[3],证实城市化扩张与碳储量下降的显著负相关关系。国内研究则聚焦于双碳目标下的区域实践,京津冀城市群通过碳排放因子法量化建设用地扩张的碳代价,发现 2000-2020 年快速城市化导致区域碳储量平均下降 15%-20%^[4],但盘州市生态修复区通过退耕还林实现碳汇能力提升 10%以上^[5]。然而,现有研究多集中于单一行政单元或均质区域,对生态功能区差异显著、地形气候复杂区域的碳效应时空异质性解析不足,且优化策略缺乏对城市-农村-生态区功能耦合的系统性考量。

巢湖流域作为长江中下游典型的三生空间交错区,兼具城市化快速推进(2001-2021 年建设用地增长 37%)与生态修复活跃(林地面积先减后增)的双重特征,其土地利用变化的碳效应过程具有较强的区域代表性。本研究基于 2001-2021 年遥感影像与 GIS 数据,构建“时空模拟-效应评估-优化策略”研究框架,突破传统单一尺度分析局限,重点解析不同生态功能区(森林保育区、农业集约区、城镇发展区)的碳效应差异,揭示建设用地扩张与林地恢复的碳储量动态平衡机制。研究旨在通过量化区域土地利用变化的碳源/碳汇时空演变规律,提出面向碳中和的差异化优化路径,为同类流域协调生态保护与高质量发展提供科学依据。

1 土地利用变化碳效应的理论基础与研究框架

1.1 土地利用变化与碳循环的关系

土地利用变化以多样且复杂的机制影响着碳排放。森林砍伐与植被破坏致使陆地生态系

统碳库受损,树木储存的碳快速释放。城市化扩张改变土地覆盖,扰动土壤有机碳加速其氧化分解。农业生产方式转变,像过度开垦、不合理灌溉施肥影响土壤微生物活性,改变土壤碳释放量^[6]。

不同土地利用类型的碳效应特征差异显著。森林依靠树木的光合作用成为强大碳汇,将碳储存于生物量、土壤及枯落物。耕地因频繁农事活动,土壤结构遭破坏,有机碳易被分解,碳汇能力较弱甚至成为碳源。城市建设用地因能源消耗大,成为主要碳排放源。草地在合理利用时能吸收碳,不合理利用则碳汇功能被削弱^[7]。

土地利用变化兼具碳源与碳汇效应。森林砍伐、城市化以及湿地排水开发等行为会增加碳排放。而植树造林、生态修复等举措可增加植被覆盖,提升生态系统碳汇能力,比如将退化土地恢复为森林或湿地,重新构建碳储存机制,助力区域碳平衡^[8]。

1.2 碳效应评估方法

碳效应评估是量化土地利用变化对区域碳储量影响的核心环节,本研究综合采用碳储量计算模型与空间分析技术,构建多维度评估框架。首先基于《IPCC 国家温室气体清单指南》,结合区域实测数据,建立碳储量计算模型,方法通过土地利用类型面积变化与碳密度参数耦合,量化不同地类的碳源/碳汇效应,与朱梅涛等在京津冀地区的碳储量评估方法类似^[9],确保区域数据的可比性。

尺度分析中,研究借助 ArcGIS 平台开展空间叠加与栅格计算,将土地利用分类数据与碳密度参数进行空间匹配,生成 30m×30m 分辨率的碳储量空间分布图。通过栅格计算器逐像元计算碳储量,参考吴然在巢湖流域碳效应研究中的技术路径^[10],通过精细化空间运算揭示“西北高、东南低”的碳储量分布格局,精准识别建设用地扩张(如合肥市区)与林地恢复(如大别山余脉)的碳储量动态变化特征。

针对区域生态功能差异,研究引入净碳效应评估指标(净碳效应=碳吸收强度-碳排放强

度),结合森林保育区、农业集约区、城镇发展区的功能定位,构建差异化评估体系。该方法参考了莫金宵在滇中城市群的固碳效应评价逻辑,通过对比不同功能区的碳排放强度与碳吸收能力,揭示“城市高碳源-农村弱碳汇-生态区强碳汇”的时空异质性规律^[11]。多维度评估框架既保留了传统碳排放因子法的简洁性,又通过空间信息技术提升了区域碳效应解析的精准度,为后续优化策略制定提供了科学依据。

2 区域土地利用变化碳效应的时空分布特征

2.1 研究区域概况

巢湖流域位于安徽省中部,地处长江流域下游左岸,是本文的研究区域。该流域自然条件优越,属于暖温带与亚热带过渡性湿润季风气候,光热水条件良好,河流密布,地形多样,土壤类型丰富,植被种类繁多。在社会经济方面,它是安徽省经济社会发展水平最高、最具潜力的地区,2021 年常住人口达 1247 万人,生产总值占全省 30%,产业结构以第二、三产业为主,交通十分便利。

在土地利用方面,2001-2021 年,耕地中水田是主要类型,但整体耕地面积逐年减少;建设用地持续增长,其中城镇用地扩张明显;林地先减后增,生态环境有所改善;草地和水域面积有波动,整体变化不大。

2.2 土地利用变化的时空模拟

在对巢湖流域土地利用变化进行时空模拟时,研究选用了合适的模型,并对相关数据进行处理与参数设置,最终得到模拟结果并展开验证与分析,具体内容如下:

2.2.1 数据处理与模型参数设置

研究选取 2001-2021 年五期 Landsat 遥感影像数据作为主要数据源,同时借助天地图、谷歌历史影像、国土调查数据以及 ArcGIS、ENVI 等软件,对数据进行预处理。利用 ENVI5.3 对 Landsat 数据进行辐射定标、大气校正、镶嵌和裁

剪等操作,以提高影像使用的准确性和精度的可靠性。在模型参数设置方面,采用支持向量机(SVM)和目视判读相结合的方法进行影像分类。SVM以结构最小原理和VC维理论为基础,在处理非线性、高维数问题时具有较好的推广性和较高的分类准确性。划分土地利用类型时,参考《土地利用现状分类》(GB/T21010-2017),结合研究需求,将地类分为6个一级类和10个二级类^[12]。

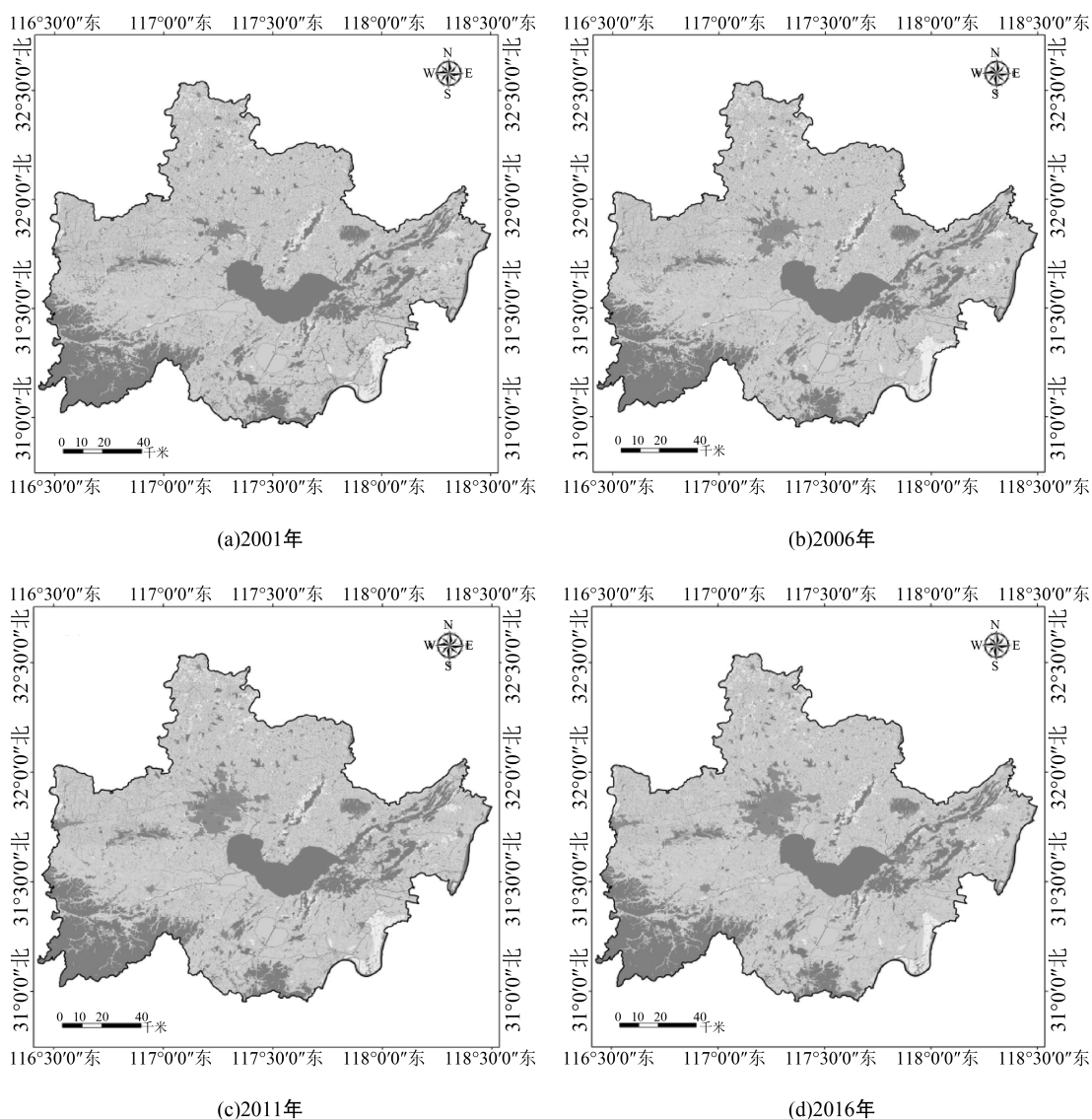
2.2.2 土地利用变化的时空模拟结果

通过上述方法,获取了巢湖流域2001-2021年五个时期的土地利用分类数据。从土地利用结构变化来看,耕地中的水田是巢湖流域最主要的土地利用类型,但2001-2021年耕地逐年减

少,建设用地逐年增长。林地在2001-2011年小幅减少之后逐渐增加,草地和水域面积有波动,整体变化不大。在空间变化上,水田转移剧烈,遍布整个研究区,始终是转入转出面积最大的地类,转入的最大来源是村庄用地,转出为城镇、交通等建设用地主要出现在城镇周围;林地大幅度增加,主要出现在原有林地附近,以及合肥市区、六安市金安区等城镇内部。2001-2021年土地利用变化的时空模拟结果如图1所示。

2.2.3 模拟结果的验证与分析

研究采用Kappa系数来检验分类精度,借助天地图影像、天地图安徽省历史影像、ArcGIS以及Google Earth Pro等工具,对2006年、2011年、2016年和2021年的分类数据展开分析验证,验



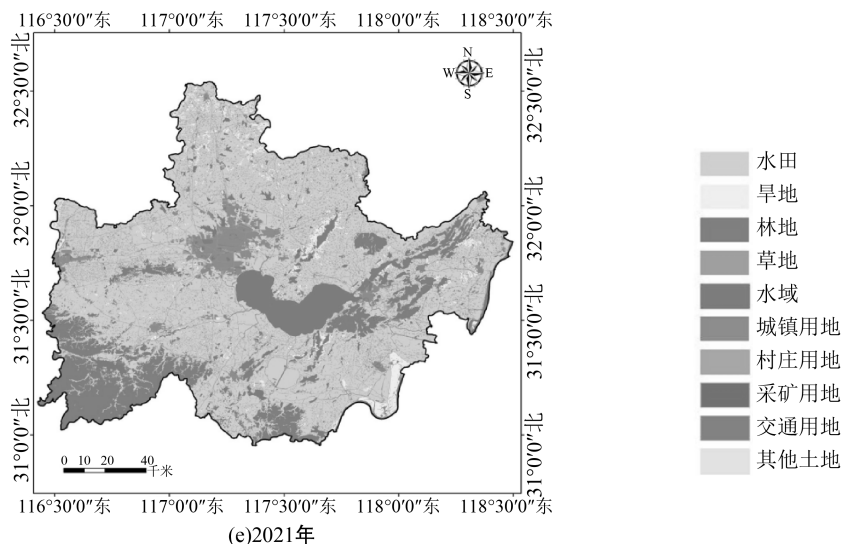


图1 2001-2021年土地利用变化的时空模拟结果

证结果如图2所示。验证结果表明,这四年遥感影像的分类成果总体精度良好,分别达到89.81%、91.82%、90.79%和90.31%,都接近90%;Kappa系数依次为0.8544、0.8851、0.8572和0.8611,均超过0.8。这充分说明分类精度能

够满足本研究的需求,确保了研究数据的可靠性和研究结果的科学性,为后续关于巢湖流域土地利用变化及碳效应等相关研究提供了坚实的数据基础。

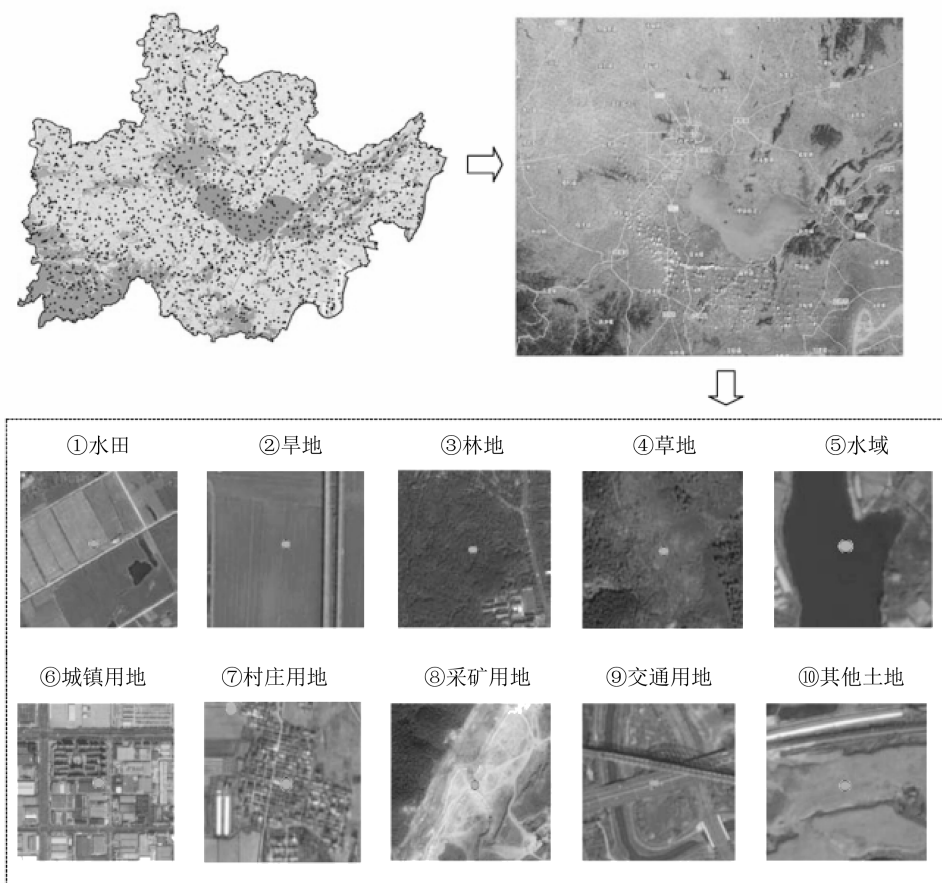


图2 验证点结果

2.3 土地利用变化的碳效应评估

土地利用变化的碳效应评估旨在量化不同土地利用类型对区域碳储量的影响。本研究基于巢湖流域 2001-2021 年土地利用分类数据,结合生态系统碳密度参数,计算了各时期土地利用碳储量的时空变化,并通过空间叠加分析揭示其分布特征。

2.3.1 碳储量计算方法

碳储量的计算采用以下公式:

$$C_t = \sum_{i=1}^n (A_{i,t} \times D_i) \quad (1)$$

其中, C_t 为第 t 年的总碳储量, $A_{i,t}$ 为第 t 年第 i 类土地利用类型的面积, D_i 为第 i 类土地利用类型的碳密度(单位: Mg C/ha)。碳密度参数参考《IPCC 国家温室气体清单指南》及区域实测数据(表 1)。

2.3.2 土地利用碳储量空间变化

基于 ArcGIS 平台,将各时期土地利用分类图与碳密度参数进行空间叠加,生成 2001-2021 年碳储量空间分布图(图 3)。

通过栅格计算器逐像元计算碳储量,公式

表 1 区域实测碳密度参数

土地利用类型	碳密度 (Mg C/ha)
林地	150.2
水田	80.5
建设用地	10.3
草地	45.6
水域	20.1

为:

$$C_{\text{pixel}} = D_i \times \text{Resolution}^2 \quad (2)$$

其中,空间分辨率为 30m×30m。

结果显示,巢湖流域碳储量呈现“西北高、东南低”的分布格局,林地集中区(如大别山余脉)碳储量显著高于城镇密集区。2001-2021 年,建设用地扩张导致碳储量减少约 12.7%,而林地恢复使碳储量增加 8.3%。

2.4 碳效应的空间异质性分析

土地利用变化的碳效应在时空分布上表现出显著的异质性,具体表现为城市与农村地区的差异、不同生态功能区的特征以及时空尺度的影响。2021 年巢湖流域碳效应时空异质性特征数

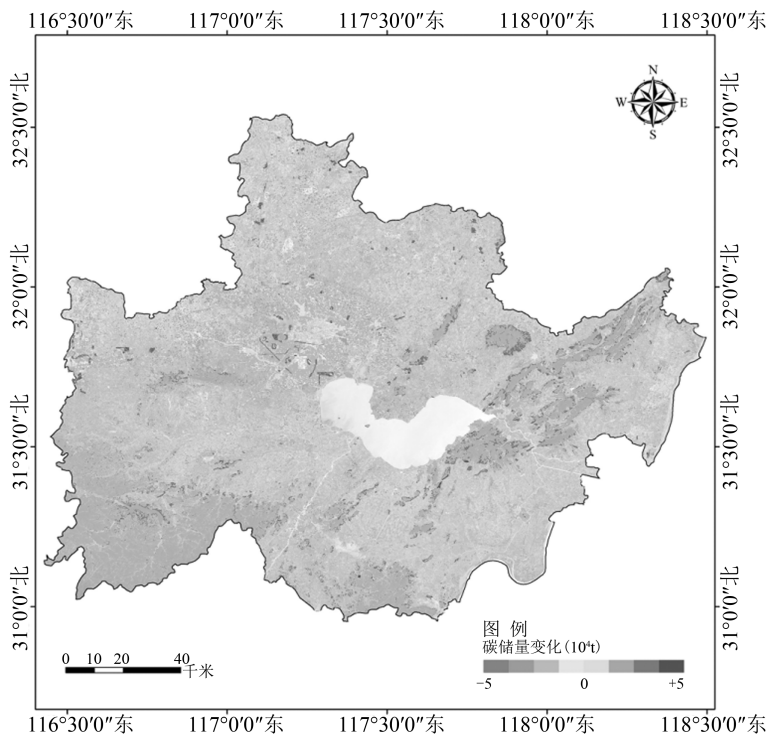


图 3 2001-2021 年碳储量空间分布图

表 2 2021 年巢湖流域碳效应时空异质性特征

分类指标	森林保育区	农业集约区	城镇发展区	水域湿地保护区
碳排放强度 (Mg C/ha)	2.1	22.1	58.7	8.3
碳吸收强度 (Mg C/ha)	148.5	20.9	5.2	18.6
净碳效应 (Mg C/ha)	+146.4	-1.2	-53.5	+10.3
面积占比 (%)	18.4	41.2	28.5	11.9

注:净碳效应=碳吸收-碳排放;正值表示碳汇,负值表示碳源。

据如表 2 所示,以下从这三个方面展开分析。

2.4.1 城市与农村地区的碳效应差异显著

城市区域以建设用地为主,碳排放强度高,如巢湖流域合肥市区 2021 年碳排放强度达 58.7Mg C/ha,主要源于工业、交通能耗及土壤有机碳氧化;而城市植被覆盖低,年均碳汇仅 5.2Mg C/ha,净碳效应为-53.5Mg C/ha。相比之下,农村区域以耕地和林地为主,碳吸收能力较强,如六安市金安区林地碳汇强度达 132.4Mg C/ha,但因水田耕作导致部分区域呈碳源特征(净效应-15.3Mg C/ha)。整体上,农村净碳效应为+24.6Mg C/ha,与城市形成鲜明对比,凸显城市化对碳排放的加剧作用。

2.4.2 不同生态功能区的碳效应特征差异显著

森林保育区(如大别山余脉)碳汇能力最强,年均碳储量增量达 8.3%,得益于退耕还林政策;农业集约区因化肥施用和土壤扰动,碳排放强度较高(22.1Mg C/ha),但水稻田季节性碳吸收使其净效应接近平衡(-1.2Mg C/ha);城镇发展区碳排放占流域总量的 67.5%,碳汇能力仅占 3.8%,是主要碳源区域;水域湿地保护区碳汇强度为 18.6Mg C/ha,但受富营养化影响,局部碳储存能力下降。

2.4.3 碳效应评估结果呈现时空动态特征

时间尺度上,2001-2011 年因快速城市化,流域碳储量年均减少 1.2%;2011-2021 年通过生态修复工程,年均增加 0.7%。空间尺度上,区域分析显示碳储量呈现出“西北高、东南低”的显著格局,而局地尺度(如合肥市区)建设用地扩张导致碳储量骤减 35%^[15]。多尺度分析可精准识别碳效应热点,为优化策略提供科学支撑。

上述分析表明,碳效应的时空异质性与土地利用类型、功能区定位及管理政策密切相关。未来优化需针对不同区域的特征制定差异化策略,以实现碳中和目标的精准落地。

3 面向碳中和的土地利用优化策略

3.1 碳中和目标下的土地利用优化原则

3.1.1 碳源-碳汇空间匹配原则

以碳储量“西北高、东南低”的空间格局为基础,强化西北部森林保育区(面积占比 18.4%)的碳汇核心功能,严格限制矿产开采与建设用地侵占;控制东南部城镇发展区(面积占比 28.5%)的碳源强度,通过空间模拟识别空间碳密度,设定碳排放总量红线。建立碳源-碳汇空间补偿机制,要求新增建设用地项目按 1:1.2 比例配套生态修复区,确保碳收支动态平衡。

3.1.2 生态功能区协同增效原则

依据上文中四类功能区的碳效应特征,制定以下差异化管控标准:森林保育区以维持 148.5Mg C/ha 碳吸收强度为核心,严格禁止非生态型开发活动,筑牢区域自然碳汇基底;农业集约区聚焦耕作模式优化,通过推广低碳耕作技术、休耕轮作及有机肥替代等措施,逐步将净碳效应由当前-1.2Mg C/ha 提升至正值,平衡农业生产与碳汇能力;城镇发展区依托绿色基础设施建设,推进城市绿地系统、立体绿化及蓝绿网络布局,将碳吸收强度从 5.2Mg C/ha 提高至 8.0Mg C/ha,缓解高强度城市化带来的碳源压力;水域湿地保护区针对富营养化导致的碳汇衰减问题,加强水质治理与湿地生态修复,维系湿地碳储存

功能稳定,通过分类施策实现不同功能区碳效应的精准调控^[13-16]。

3.1.3 多尺度动态平衡原则

统筹区域与局地尺度的碳效应时空动态特征,构建差异化空间管控阈值:在区域层面,基于建设用地扩张导致 12.7%碳损失与林地恢复带来 8.3%碳增益的历史数据比值,设定林地恢复面积须 \geq 建设用地扩张面积的 30%,通过生态用地占补平衡机制确保流域碳汇能力稳步提升;在局地层面上,依据碳密度空间分异特征,划定碳汇保护核心区实施严格生态保护红线管控,禁止任何形式的开发建设活动,同时将碳密度 $<20\text{Mg C/ha}$ 的城镇密集区划定为碳源重点管控区,实行建设用地规模刚性约束与低碳开发强度管控,通过跨尺度协同治理实现区域碳储量“全局增汇”与“局部控源”的双向平衡^[17]。

3.2 优化策略的实施路径

3.2.1 城镇发展区低碳转型路径

针对城镇发展区占流域碳排放总量 67.5%的高碳特征,构建“水平-垂直-强度”三维管控体系:在水平维度,依托上文验证的高精度模拟模型($Kappa>0.85$)预测 2030 年建设用地扩张趋势,结合林地恢复区空间分布划定生态安全屏障,遏制城镇无序蔓延对碳汇空间的挤占;垂直维度推行立体绿化技术,通过屋顶花园、墙面粉植等立体植被系统将城镇植被碳汇强度从 5.2Mg C/ha 提升至 8.0Mg C/ha ,以生态补偿机制缓解 58.7Mg C/ha 的高强度碳排放压力;强度维度建立建设用地碳效率准入标准,将单位 GDP 碳排放强度严格控制在区域均值 1.27Mg C/万元 以下,通过低碳产业准入与绿色建筑标准推动城镇发展从“高碳扩张”向“低碳集约”转型^[18]。

3.2.2 农业集约区碳汇提升路径

聚焦占流域面积 41.2%的农业集约区,以“种植链优化-技术链升级-价值链延伸”实现碳汇能力系统性提升:在种植链层面,针对水田耕作导致的碳源特征(净效应 -15.3Mg C/ha),推广稻-油轮作与休耕轮作模式,参照上文中碳密

度参数设计土壤有机碳提升路径,目标实现年均 1.2%的土壤有机碳密度增长;技术链层面应用保护性耕作技术(如免耕、秸秆还田),直接降低 22.1Mg C/ha 的农业碳排放强度,推动净碳效应从 -1.2Mg C/ha 转为正值;价值链层面探索“生态农田-碳汇交易”机制,将 20.9Mg C/ha 的碳吸收强度转化为可交易的碳汇产品,通过市场手段激励低碳耕作行为,构建“生产固碳-技术减排-经济增益”的闭环体系。

3.2.3 生态功能区系统修复路径

基于森林保育区 148.5Mg C/ha 的强碳汇能力及 2001-2021 年 8.3%的碳增益基础,实施精准修复工程:在森林质量提升方面,针对现有林地 150.2Mg C/ha 的碳密度,通过补植麻栎、枫香等高固碳树种,将碳密度提升至 165Mg C/ha ,预计每年新增碳汇 $4.2\times 10^4\text{Mg C}$;湿地碳汇恢复聚焦水域湿地保护区,通过重建芦苇群落等原生植被,将碳吸收强度从 18.6Mg C/ha 提升至 25.0Mg C/ha ,有效抵消 8.3Mg C/ha 的湿地碳排放;生态廊道连通工程整合 18.4%的森林保育区与 11.9%的水域保护区,构建跨区域碳汇网络,使生态空间碳通量增加 15%,形成“点上增汇、线上连通、面上协同”的立体修复格局,强化流域碳汇系统的整体性与连通性。

4 结语

本研究构建“时空模拟-效应评估-优化策略”框架,揭示巢湖流域土地利用变化碳效应的时空异质性,发现 2001-2021 年建设用地扩张导致碳储量减少 12.7%,林地恢复使其增加 8.3%,且不同生态功能区碳效应差异显著。据此提出城镇发展区三维管控、农业集约区三链整合与生态功能区系统修复等策略,为区域碳中和目标实现提供科学路径。研究兼具理论创新性与实践指导性,对同类区域有借鉴意义。但研究未考虑气候变化对土地利用的反馈及政策实施动态影响,未来可结合气候模型与政策模拟,深化多目标协同优化机制,为土地利用管理提供更精准决策支持。

参考文献(References):

- [1] 李雨晨,秦宇,杨柳,等.长江上游大中型水库碳排放量估算与分析:以IPCC国家温室气体清单指南为基础[J].湖泊科学,2023,35(01):131-145.
- [2] Wulder M A, Roy D P, Radeloff V C, et al. Fifty years of Landsat science and impacts[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 280: 113195.
- [3] Jones S M, Smith A C, Leach N, et al. Pathways to achieving nature-positive and carbon-neutral land use and food systems in Wales[J]. Regional Environmental Change, 2023, 23(01): 37.
- [4] 陈靖松,张建军,李金龙,等.京津冀地区碳排放时空格局变化及其驱动因子[J].生态学报,2024,44(06):2270-2283.
- [5] 张杰荣.盘州市退耕还林工程效益评价[J].现代农业科技,2025,54(05):101-104.
- [6] 佟佳骏.土地利用变化对陆地生态系统水、碳循环过程的影响评价[D].咸阳:西北农林科技大学,2024.
- [7] 马军,索米娅.草原碳汇价值与畜牧业生产水平耦合协同发展——以内蒙古自治区为例[J/OL].中国农业资源与区划,1-14[2025-05-08].
- [8] 林彦君,木合塔尔·艾买提,阿迪莱·伊斯马伊力.基于系统动力学的农用地碳汇碳源效应分析——以喀什地区为例[J].江苏农业科学,2024,52(16):263-270.
- [9] 朱梅涛,李翺,邢莉圆,等.基于时空异质性分析的京津冀地区碳减排策略研究[J/OL].中国地质,1-22[2025-05-08].
- [10] 吴然.巢湖流域土地利用碳效应时空分异分析与低碳优化模拟[D].徐州:中国矿业大学,2023.
- [11] 蔡佳雪,代智彬,赵良仕,等.东北三省碳排放时空异质性分析及其影响因素[J/OL].首都师范大学学报(自然科学版),1-13[2025-05-08].
- [12] 吕利娜,方强,叶欣,等.双鸭山市城市热岛效应时空格局变化及模拟预测[J].现代城市研究,2022,37(07):7-13.
- [13] 刘雅雅,李欣欣,任茜,等.国土空间规划情景下市域土地利用变化预测及碳效应研究——以达州市为例[J].四川环境,2024,43(06):73-80.
- [14] 张翔,段政,董颖,等.中国东部中生代火山岩区地质文化村建设实践与思考——以福建杞溪为例[J].华东地质,2022,43(04):474-489.
- [15] 倪斌,黄照强,郭健,等.基于机载和星载高光谱遥感的武夷山成矿带蚀变矿物信息识别研究[J].华东地质,2023,44(01):67-81.
- [16] 黄学勇,高茂生,侯国华,等.莱州湾海洋沉积物粒度特征及其环境响应分析[J].华东地质,2023,44(04):402-414.
- [17] 彭卓越,李梦婷,梁煜彬,等.长江流域江苏段碳储量的多情景模拟和空间格局优化[J/OL].环境科学,1-17[2025-05-08].
- [18] 曹津铭.双碳背景下东台市低碳产业发展对策研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.

作者简介:

第一作者/通讯作者:何亚莉,1990年生,女,安徽安庆人,硕士,安徽省第一测绘院,助理工程师,主要研究方向为计算机科学与技术。Email:964406751@qq.com

Spatiotemporal Simulation and Optimization of Carbon Effects of Regional Land Use Change for Carbon Neutrality

HE Yali

(Anhui Provincial Institute of Surveying and Mapping, Anhui 230001, China)

Abstract: In sight of the insufficient analysis of the spatiotemporal heterogeneity of carbon effects in areas with significant differences in ecological function zones, this study takes the Chaohu Lake Basin as a typical case, which integrates multi-source remote sensing data and GIS technology, and constructs a research framework of “spatiotemporal simulation-effect evaluation-optimization strategy”. Based on the spatiotemporal simulation of land use from 2001 to 2021 ($Kappa > 0.85$), the dynamic balance mechanism of 12.7% reduction in carbon storage caused by the expansion of construction land and 8.3% increase in it due to the restoration of forest land was quantified. Spatial heterogeneity analysis indicates that the carbon emission intensity in the urban development area (58.7Mg C/ha) accounts for 67.5% of the total amount of the basin, and the net carbon effect is -53.5Mg C/ha. The carbon sink intensity of the forest conservation area reached 148.5Mg C/ha, accounting for 18.4% of the area but contributing 82.3% of the total carbon sink of the basin. Based on this, a multi-scale optimization strategy is proposed: for urban areas, the carbon absorption intensity is increased to 8.0Mg C/ha through three-dimensional greening and low-carbon access standards; the adoption of conservation tillage in agricultural areas has transformed the net carbon effect from -1.2Mg C/ha to a positive value. The ecological area has increased the carbon density to 165Mg C/ha by replanting high-carbon-sequestration tree species. The research results provide a scientific paradigm for optimizing the carbon balance in the “three-life space” at the basin scale and support the precise implementation of the carbon neutrality goal.

Key words: carbon neutrality; land use change; carbon effect; spatiotemporal simulation; optimization strategy