

# 基于 eCognition 及 Invest 模型的 南通市绿色空间碳储量演变及优化路径研究

吴锦豪 施嘉霖 毛 靓\*

东北林业大学 黑龙江哈尔滨 150040

**摘要:** 城市绿色空间在碳中和战略中发挥着关键生态作用。本文以江苏省南通市为例, 融合遥感智能分类软件 eCognition 与生态系统服务评估模型 InVEST, 构建适用于中等城市尺度的绿色空间碳储量估算技术体系。通过构建多尺度影像分割网络与 CART 分类决策树, 提升了城市异质地物识别精度, 并在此基础上进行碳储量定量分析。研究发现, 2006—2022 年间, 南通市碳储量呈现先下降后上升的演变特征, 变化趋势受城市扩张强度与土地利用类型调整显著影响。空间上, 北部和西部区域碳储密度高于南部与沿江区域。耕地和林地是主要碳储贡献地类, 水体与建设用地碳密度最低。研究表明, 耦合遥感分类与生态建模可提升城市绿色空间碳储监测的科学性, 为城市碳汇管理与双碳目标实现提供决策参考。

**关键词:** 绿色空间; 城市碳储量; eCognition; InVEST; 遥感分类; 生态模拟

## 引言

随着全球气候变化加剧, 碳达峰与碳中和(“双碳”)战略成为全球共识。IPCC 第六次评估报告指出, 若不显著减少温室气体排放, 未来 20 年全球地表温度可能升高超过 1.5℃, 引发更频繁的极端气候事件。在此背景下, 中国提出“2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和”的发展目标, 城市作为碳排放主阵地, 其碳汇潜力与空间格局的研究已成为生态城市建设的重要组成部分。

城市绿色空间是城市生态系统的重要组成部分, 其固碳作用不仅直接体现在植物光合作用吸收 CO<sub>2</sub>, 还体现在调节城市小气候、提升生物多样性与减少能源消耗等多重生态服务功能中。相比森林、草原等自然生态系统, 城市绿色空间更具复杂性与不确定性, 其碳储特征与响应机制有待深入研究。

目前, 国内外对于城市绿色空间的定义尚未统一。一般而言, 城市由绿色空间与灰色空间组成, 其中绿色空间是维持城市生态平衡、推动可持续发展的核心, 具备生态调节、休闲游憩、美学等多种生态系统服务功能。与传统的城市绿地系统相比, 城市绿色空间的范围更广, 涵盖建成区内外的各类生态空间, 如公园绿地、防护绿地、生产绿地、附属绿地, 以及周边农田、森林、湿地等。

碳储量研究主流方法有两种。一是利用遥感影像结合数据模型计算, 能快速获取大区域碳储量特征, 但传统遥感

影像区分地物有局限, 计算结果与实际有偏差, 不适用于小尺度研究。二是基于样地调查的实测法, 通过清查样方获碳储量基础数据, 可考虑植物碳储量差异, 但调研工作量大, 仅适用于小尺度。本研究将两者结合用于中等尺度的南通市碳储量估算, 并优化土地用地分类, 借助 Cart 算法和 eCognition 软件, 将城市绿色空间分为八类, 为样方实测与碳储量精准计算打基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 场地数据

本研究以江苏省南通市为研究区域。现有研究多聚焦于特大型城市, 这类城市城市化水平较高, 第一产业占比相对较低。然而, 南通市在 2021 年第一产业增加值占 GDP 的 4.5%, 城市化率为 65%。根据《南通市“十四五”规划》, 到 2025 年城市化水平预计提升至 74%。南通市的产业结构和城市发展历程在一定程度上能够代表中国多数中小城市, 特别是东部和南部沿海城市。因此, 研究南通市绿色空间的碳汇能力具有较强的普适性和参考价值。

南通市位于江苏省东南部, 总面积约 8001 km<sup>2</sup>, 属于北亚热带湿润气候区, 地势平坦。主城区以人工植物群落为主, 主要植被类型为乔、灌、草复合群落, 其中灌木层树种密度较高。风景名胜区和滨海滩涂湿地则以自然植被群落为主, 滨海滩涂以野生草本植物群落占优, 适应特殊的土壤和水文条件, 具有重要的生态平衡维持功能。

鉴于南通市地域广阔，单幅遥感影像难以覆盖全域，且本研究关注地物类型区分，因此对遥感影像的空间分辨率要求为中等。经过多种遥感数据的对比分析，本研究最终选用 Landsat 系列遥感影像，并对数据进行融合、裁剪等预处理，以确保分析的准确性和适用性。

### 1.2 遥感信息提取及地物分类

本研究利用 ENVI 和 eCognition 软件进行遥感信息提取与地物分类。其中，eCognition 采用模糊分类算法，可提高空间影像数据的自动识别精度，为植被景观研究提供定量化解析方法。

#### (1) 数据预处理

本研究使用 2006 - 2022 年 Landsat 系列遥感影像。影像数据经 ENVI 处理，包括影像融合、几何校正、辐射定标、大气校正等步骤，以确保数据一致性和可比性。此外，提取波段反射率、植被指数（NDVI 等）及纹理特征等遥感参数，为后续分类提供输入变量。

#### (2) 多尺度影像分割

采用多尺度分割技术构建遥感影像对象的层级网络。为解决不同地物在不同尺度下的异质性问题，同时减少计算量并提高分割精度，本研究参考已有研究，确定异质度量准则计算公式。经过计算和调试，最终采用三级尺度分割方法，形成 a、b、c 三级多尺度分割体系，并根据地物特征设定适宜的分割尺度与区分参数。

#### (3) 分类方法

基于多尺度分割影像，结合实地考察和遥感影像数据，采用 eCognition 中的 CART (Classification and Regression Trees) 决策树分类器进行地物分类。该方法综合统计光谱特征、植被指数、形状特征、纹理特征等四大类共 19 个变量，其中纹理特征用于区分光谱相似的地物类别。

在 CART 决策树分类过程中，采样点的选择遵循代表性和均匀性原则，依据地形地貌特征和不同地类的面积比例，确定样本点的数量和分布。例如，以 2022 年数据为例，针对不同地貌类型设定相应的样本数量和面积比例，以提高分类的科学性和稳定性。

#### (4) 分类精度评价

分类精度采用混淆矩阵和 Kappa 系数进行评价。结合南通市土地利用数据和调研勘察结果，对样本点的地物类型进行人工校正，并计算 Kappa 系数及混淆矩阵，评估分类

精度和城市绿色空间的土地利用类型识别准确性。

### 1.3 碳储量计算方式

研究发现，南通市绿色空间中枯死木等生物量占总碳储量约 0.3%。考虑调研数据限制，采用 InVEST 模型计算碳储量。该模型是大区域生态系统碳储量估算常用模型，设生态系统碳储量由地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库和死亡有机碳库 4 部分组成。统计不同土地利用类型 4 个碳库平均碳密度，结合各地类面积算总碳储量。

针对南通市绿色空间，实地调研获取植被基础情况，算地上生物量碳库碳密度。用生物量法算地上部分生物量及碳储量，依《造林项目碳汇计量与检测指南》树木异速生长方程算植物生物量，植物碳储量为生物量乘 0.5。草地和水体碳汇储量依单位面积固碳速率、时间和面积计算。特殊植物类型，如竹林、耕地，采用特定计算方法或借鉴研究成果。地下植被碳密度、土壤碳密度、死亡有机碳密度等多借鉴相关学者研究数据。

## 2 结果

### 2.1 南通市土地用地类型及精度验证

基于 CART 决策树与 eCognition 平台构建的分类模型，对南通市 4 个年份遥感影像进行了地物识别。除建设用地外，其余八类均归入绿色空间范畴，包括乔木林地、灌木林地、竹林地、果园地、耕地、草地、水体、滩涂湿地。以 2022 年为例，共选取 300 个样本点用于分类精度评估，结果显示总体分类精度达到 89.4%；Kappa 系数为 0.839，说明分类结果具备较强的一致性；各类地物识别效果良好，其中乔木林地和耕地的用户精度分别为 91.3% 和 88.7%，灌木林地与果园地存在一定混淆，但通过多特征输入有效缓解。结果表明，构建的分类体系能够准确地反映南通市绿色空间的空间分布特征，为后续碳储估算提供可靠基础。

### 2.2 南通市绿色空间碳汇总量

研究估算出 2006-2022 年南通市碳储量先降后升。2006 年、2012 年、2017 年、2022 年碳储量分别为  $1.02 \times 10^8$ t、 $1.05 \times 10^8$ t、 $8.45 \times 10^7$ t、 $1.17 \times 10^8$ t。与国内其他城市相比，南通市碳储量处于中等水平，变化趋势主要受到以下因素影响，地理因素方面，地处冲积平原，自然乔木林和灌木林主要为幼龄林，碳储量相对较低；在城市发展方面，城市化进程加快导致部分绿色空间被建设用地取代，一度引起碳储量下降；在农业活动方面，南通市作为重要的第一产业基地，

大规模水稻种植的碳排放影响整体碳储量。

### 3 讨论

#### 3.1 南通市绿色空间植被基础情况

基于 InVEST 模型特点,采用分层抽样结合遥感影像与实地调查,在南通市设 90 处调研采样点。发现城市建设范围内绿色空间植物种丰富,乔木层物种丰富度指数最高,但不同区域绿地物种丰富度差异大,新建绿地和新城地区高于老旧城区。城市建设用地范围外,风景游憩绿地植被保护好,耕地及未建设区域植物种类单一,生态系统不稳定。

从绿色空间组成看,2022 年耕地占比 70.57%,是最重要组成部分,此外乔木林地、沿海滩涂及湿地、水体也重要,南通市城市绿地分布不均,集中在东南部及东北部新城和县级市主城区。

#### 3.2 绿色空间碳储量总体特征

以 2022 年 90 个样地数据为例,样地碳储量  $691.7758t \cdot hm^{-2} - 44302.28t \cdot hm^{-2}$ ,均值  $16007.23t \cdot hm^{-2}$ 。不同绿色空间类型碳储量差异大,竹林地及灌木林地、人工乔木林地和天然乔木林地碳储量较高,天然乔木林及人工乔木林样地碳储量变化不稳定,果园地相对稳定。滩涂湿地样地碳储量呈现“首位效应”,即部分区域碳储量较高,但整体占比仍较低。

综合不同绿色空间类型碳储量密度及样地情况,算出不同用地类型碳储能力及碳储量。耕地碳储量大但碳储密度低;水体总体低碳储密度区,但水域面积大对碳储量提升重要;乔木林地碳储能力强,是重要碳储空间;滩涂湿地碳储量占比约 3%,碳储力待提升。

#### 3.3 绿色空间分布特征

2006—2022 年间,南通市碳储量经历先降后升的过程,反映出城市发展阶段与碳储变化之间的密切关系。2006 至 2017 年间,城市快速扩张期,绿色空间大面积转为建设用地,林地和农田被蚕食,导致碳储量下滑;2017 至 2022 年间,城市进入调整与精细化发展阶段,土地开发强度下降,新增绿地与修复绿带政策逐步见效,碳储量回升,空间格局趋稳。这说明,土地利用方式是城市碳储变化的核心驱动因子,而碳储空间格局的优化亦可视为衡量城市绿色发展的有效指标。

#### 3.4 提升路径建议与借鉴意义

基于南通市绿色空间结构与碳储特征,提出如下建议:加强森林与复合林种植,在城郊、丘陵地带推进复合乔灌草

系统建设,提升单位面积碳汇效率;耕地结构绿色转型,推动绿色农业、减少农田温室气体排放,提高土壤碳储能力;滨海湿地生态恢复,扩大芦苇滩涂、构建盐沼湿地系统,发挥其“蓝碳”潜力。南通市作为典型的滨海中等城市,其城市演变路径、绿色空间变动模式,具有代表性,相关经验可为其他沿海中小城市提供科学参考与借鉴。

### 4 结论

#### 4.1 讨论

##### (1) 绿色空间碳储量的演变趋势及其驱动机制

2006—2022 年间,南通市绿色空间碳储量呈先降后升的阶段性变化趋势,其背后主要受城市化进程与土地利用结构调整的共同驱动。在快速城市化阶段,大量绿色空间,高碳储能力的林地,被转化为低碳储密度的建设用地,造成城市碳储水平下降。这种趋势反映出城市开发过程中绿色空间被压缩,印证了城市土地利用变化是影响城市碳储容量的因素之一。

进入城市化相对稳定期后,城市扩张速度放缓,部分区域土地利用格局逐步趋于合理。原有的绿色空间得到保护,部分退化生态系统开始修复,植被重新生长,碳汇能力逐渐恢复。城市碳储量出现回升趋势。这一变化表明,城市碳储量并非线性下降,而是呈现与城市发展周期紧密耦合的动态波动,强调了在城市空间扩张过程中科学规划与生态预留的重要性。

故而,在城市土地利用中,应避免过度建设导致的绿色空间破碎化问题,强化城市绿地系统的整体性与连通性。

##### (2) 耕地的碳储作用及优化方向

耕地在南通市绿色空间中占据重要比例,尽管水稻种植过程中会排放一定碳,导致耕地碳储密度低于乔木林地和灌木林地,但由于耕地面积广阔,总碳储量仍然可观。

水稻在生长过程中通过光合作用吸收  $CO_2$  并固定碳,同时土壤中的有机质也存储了一定量的碳。因此需应充分考虑耕地的碳汇价值,采取科学的农业生产措施,如优化水稻种植技术,减少温室气体排放。

##### (3) 水体资源对碳储量的贡献

水体在碳储存方面虽属于低碳储密度区域,但在调节区域气候、维持生态平衡方面起着不可替代的作用,并间接促进了碳储量的提升,如水体可改善周边环境湿度和温度,为陆生植被提供更适宜的生长环境,从而增强固碳能力。

结果表明,绿色空间作为城市碳汇系统的关键组成,应在国土空间规划中明确其生态优先级。在城市发展的不同阶段,应统筹经济发展与生态保护,构建多元功能用地协同构成的城市绿色基础格局。通过引入生态红线、城市碳预算管理、碳储估算动态监测等手段,实现土地开发与生态系统服务的长期均衡。

#### 4.2 结论

本研究用 cart 算法和 eCognition 软件将南通市土地用地类型细分为八类,经样地实测和计算得:

(1)2006–2022年,南通市碳储量及碳汇密度先降后升,2022年碳储量较2006年提升 $1.5 \times 10^6$ t。空间上,北部高于南部,西部略高于东部,城市建设用地周边低于其他区域。

(2)不同土地类型碳储密度差异大,与海拔正相关。植被区碳储密度总体高于水体及湿地,滩涂及湿地经保护和技术手段有望提升碳储量。

(3)城市快速发展致碳储量下降,城市化进程放缓、布局稳定后,碳储量逐步恢复提升。

本研究验证了土地分类方法的可行性,明确了东南沿海地区碳储提升的优势与挑战,为其他地区的碳储研究提供了参考,并为南通市提升碳储能力、推动“双碳”目标指明了方向。

#### 参考文献:

[1]王少剑,田莎莎,蔡清楠,etal.产业转移背景下广东省工业碳排放的驱动因素及碳转移分析[J].地理研究,2021,40(09):2606–22.

[2]向书江,杨春梅,谢雨琦,etal.近20年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移[J].环境科学,2024(5):1–18.

[3]罗鑫玥,陈明星.城镇化对气候变化影响的研究进展[J].地球科学进展,2019,34(09):984–97.

[4]王敏,石乔莎.城市高密度地区绿色碳汇效能评价指标体系及实证研究——以上海市黄浦区为例[J].中国园林,2016,32(08):18–24.

[5]徐飞,刘为华,任文玲,etal.上海城市森林群落结构对固碳能力的影响[J].生态学杂志,2010,29(03):439–47.

[6]于洋,王昕歌.面向生态系统服务功能的城市绿地碳汇量估算研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(01):95–102.

[7]薛雪,张金池,孙永涛,etal.上海常绿树种固碳释氧和降温增湿效益研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(03):81–6.

[8]张桂莲.上海市森林生态服务价值评估与分析[J].中国城市林业,2016,14(03):33–8.

[9]仲启铖,张桂莲,崔心红.崇明三岛森林生态系统服务价值动态评估[J].中国城市林业,2018,16(04):22–7.

**作者简介:**吴锦豪(1998–),男,汉族,广东省惠州市人,硕士研究生在读(东北林业大学),硕士研究生三年级,研究方向风景园林规划设计。

通讯作者:毛靓