广州市土地利用变化与碳储量模拟*

——基于 PLUS-InVEST 模型分析

唐娇华 李智琦 潘勇军

广州市林业和园林科学研究院/广州城市生态系统国家定位观测研究站 广州 510405

摘要：快速的工业化和城市化极大影响了城市生态系统的碳固存能力，基于此背景，文章以广州市为研究对象，利用 2000—2020 年的土地利用数据，耦合 PLUS-InVEST 模型，分析土地利用和碳储量的时空变化，探究不同城乡梯度下碳储量的影响因素；设定 3 种不同的发展情景模拟预测不同情景下的土地利用变化和碳储量空间格局演变。结果表明：1）2000—2010 年广州市碳储量流失较为严重，2010—2020 年下降速度有所减缓，林地和耕地向建设用地的转化是碳储量下降的关键原因；2）在城区、市郊、市域 3 种城乡梯度下，NDVI、DEM、坡度、年均蒸发量、年均降水量和土壤含水量均与碳储量正相关，年均气温、夜间灯光指数、GDP 和路网密度均与碳储量负相关；3）2030 年，3 种情景下碳储量均呈下降趋势，其中综合发展情景下碳储量下降程度最小，在空间上 3 种情景总体呈现“北高南低”的分布特征。研究结果有助于优化土地资源紧张的城市生态系统碳循环，促进区域的可持续发展。

关键词：碳储量；土地利用；城市化；多场景模拟

DOI：10.12169/zgcsly.2024.07.09.0006

Simulation of Land Use Change and Carbon Storage in Guangzhou Based on the PLUS-InVEST Model

Tang Jiaohua Li Zhiqi Pan Yongjun

(Guanzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture/Guangzhou National Field Station for Scientific Observation and Research of Urban Ecosystem, Guangzhou 510405, China)

Abstract: Rapid industrialization and urbanization have significant impacts on the carbon sequestration capacity of urban ecosystems. With the land use data from 2000 to 2020 in Guangzhou City, the temporal and spatial changes in land use and carbon storage are analyzed by coupling with the PLUS-InVEST model to explore the influencing factors to carbon sequestration in different urban-rural gradients. Three development scenarios are set up to simulate and predict the evolution of land use changes and carbon storage spatial patterns. The results show: 1) In 2000-2010, Guangzhou had a relatively severe loss of carbon storage, while the loss rate slowed down in 2010-2020. The conversion of forest land and farming land to construction land is the pivotal factor to this decline; 2) Across the urban, suburban, and city-wide gradients, factors such as NDVI, DEM, slope, average annual evaporation, average annual precipitation, and soil moisture content positively correlate with carbon storage while average annual temperature, night light index, GDP, and road network density display a negative correlation with carbon storage; and 3) The carbon storage in the three scenarios presents a declining trend for the future, while under the future natural development, economic priority, and

收稿日期：2024-07-09

* 基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFE0193200）

第一作者：唐娇华（1998- ），女，硕士，研究方向为城市生态和碳汇研究。E-mail：tang_ jiaohua@163.com

通讯作者：李智琦（1979- ），女，博士，高级工程师，研究方向为城市生态和生物多样性研究。E-mail：2278554670@qq.com

comprehensive development scenarios, though the rate of decline is mitigated, while the comprehensive development scenario sees the smallest decline of carbon storage. Spatially, all of the three scenarios present the distribution characteristics of high in the north and low in the south. The results of the study are conducive to optimizing the carbon cycle of ecosystems and promoting sustainable regional development in the cities in shortage of land resources.

Keywords: carbon storage; land use; urbanization; multi-scenario simulation

全球气候变化已成为人类社会发展面临的严峻挑战，国际气候变化专门委员会（IPCC）指出人类活动导致全球温度比工业化前时期升高了 1.0 ℃，2030—2052 年将比工业化前升高 1.5 ℃。进一步研究表明，区域土地利用变化是生态系统碳储量变化的主要驱动因素，土地利用变化直接改变生态系统类型，进而影响生态系统的净初级生产力和相应的土壤有机碳输入[1]，尤其是在城市化过程中，土地利用变化导致的碳储量变化对全球气候变化具有不可忽视的作用。

在碳储量评估方面，InVEST 模型以其模拟精度高、评价结果可视化、适用于大规模碳储量评估等优点得到广泛应用[2-5]。InVEST 碳储量模型通过土地利用数据和对应的碳密度值估算碳储量，因此，碳密度的准确性对于模型输出结果的质量至关重要。受限于实地测量的周期长、难度大等因素，多数研究采用文献法并结合邻近区域的相关研究数据进行修正获取碳密度[2-8]。广州作为城镇化程度较高的城市，碳固存特性与周边地区存在差异，其主要碳汇源为城市森林，这使得城市森林的碳密度数据尤为关键。

随后，研究人员开始关注未来碳储量的预测与估算，通常采用土地利用预测模型与碳储量估算模型相结合的方法[4-8]。由于人类活动频繁、规划建设复杂，城市环境斑块通常呈现显著的破碎化特征[9]。PLUS 模型作为一种土地利用变化预测模型在模拟破碎斑块方面表现较好，特别适用于城市环境。

广州市作为中国的重要经济中心，在快速城市化进程中具有典型性和代表性，因此本研究基于土地利用数据，选取 13 种关键驱动因素，利用 PLUS 模型模拟广州市在自然发展、经济优先、综合发展 3 种不同情景下的土地利用空间格局，耦合 InVEST 模型分析和模拟不同情景下土地利用变化对碳储量的潜在影响，并进一步分析碳储量的相关影响因素。以期为制定更具针对性和可持续性的生态保护政策以及实现“双碳”目标提供科学依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

广州市（112°57′—114°3′E，22°26′—23°56′N）位于珠江三角洲北缘，濒临南海，总面积约 7 434.4 km^2，地势由东北向西南倾斜。广州市属典型的南亚热带季风性海洋气候，年均气温 21.4～22.4 ℃，日均气温 0 ℃以上，年日照 1 770～1 940 h，年均降水量 1 689.3～1 876.5 mm，雨季（4—9 月）降水量占全年的 85%。

1.2 数据来源

本研究的数据包括土地利用数据、自然环境数据、社会经济数据、交通区位数据、限制转换数据和森林资源清查数据（表 1），其中土地利用数据划分为林地、灌木、草地、耕地、建设用地、水体和湿地 7 类。除林班数据外，所有数据均利用 ArcGIS 软件重采样到 30 m 的空间分辨率。

2 研究方法

2.1 土地利用变化预测

2.1.1 PLUS 模型

PLUS 模型结合了用地扩张分析模型（LEAS 模块）以及基于多类型随机种子的元胞自动机模型（CARS 模块），能够模拟不同情景下的土地利用变化。本研究基于 LEAS 模块，从自然环境、社会经济及交通区位 3 个维度选取 13 种关键驱动因素（表 1），提取 2000—2020 年用地扩张变化的潜在驱动因素，挖掘土地利用变化的成因，估算各地类的发展概率以及驱动因素对各类用地扩张的影响，结合马尔可夫链，设计不同情景，基于 CARS 模块预测 2030 年广州市土地利用变化情况。

表 1　数据来源

数据类型	数据名称	空间分辨率/m	数据来源
土地利用数据	土地利用数据	30	地球大数据科学工程数据共享系统(https://data.casearth.cn)
自然环境数据	DEM	1 000	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)
	坡度	1 000	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)
	坡向	1 000	根据 DEM 数据计算得出
	NDVI	30	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn)
	年均气温	1 000	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn)
	年均降水量	1 000	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn)
	年均蒸发量	1 000	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn)
	土壤含水量	1 000	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)
社会经济数据	GDP	1 000	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn)
	人口密度	1 000	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn)
	夜间灯光数据	30	地球观测组织的 VIIRS_DNB_VNLV2 数据集(https://eogdata.mines.edu)
交通区位数据	路网密度	30	利用 OSM 公路数据计算得出(http://openstreetmap.org)
	到铁路距离	30	利用 OSM 铁路数据计算得出(http://openstreetmap.org)
限制转换数据	水域	30	土地利用覆盖数据提取得出
	自然保护区及生态保护红线	30	广州市林业和园林局获取
森林资源清查数据	林班数据	—	矢量数据;广州市林业和园林局获取

2.1.2　情景设计

综合考虑广州市当前的发展情况和未来的社会经济发展规划，参考《广州市国土空间总体规划（2018—2035 年）》等政策文件及相关研究[8,10]，利用马尔可夫链、土地利用转换成本以及限制变化设置了以下 3 种土地利用变化情景：1）自然发展情景：以 2010 年和 2020 年土地利用数据为基础，利用马尔科夫链和 PLUS 模型，模拟在无任何外部政策或人为干预的条件下，2030 年土地利用空间分布的自然演变趋势。2）经济优先情景：以 2030 年自然发展情景下各类土地类型面积为基础，灌木、草地、水体、湿地、耕地转化为建设用地的概率增加 15%，林地转化为建设用地的概率增加 10%，并控制建设用地面积占市域面积的 30%以内。3）综合发展情景：考虑生态保护和经济发展要相适应的情况，根据 2030 年自然发展情景下各类土地的总需求，耕地和林地向建设用地转换的概率降低 30%，草地、水体、灌木、湿地向建设用地转换的概率降低 20%，并将自然保护区、生态保护红线范围以及水域设置为限制变化区域。

2.2　碳储量估算

2.2.1　InVEST 模型

InVEST 碳储量模型考虑了 4 种类型的碳库：地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤有机质碳库、死亡有机质碳库。模型以不同土地利用类型为基本评估单元，各类土地利用类型的碳密度及碳储总量计算公式如下：

$$C_i = C_a + C_b + C_s + C_d \quad (1)$$

$$C_t = \sum_{i=1}^{n} C_i \times A_i,\ (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (2)$$

式（1）~（2）中：C_i为第 i 种土地利用类型的碳密度（$t \cdot hm^{-2}$）；C_a为地上生物量碳密度（$t \cdot hm^{-2}$）；C_b为地下生物量碳密度（$t \cdot hm^{-2}$）；C_s为土壤有机质碳密度（$t \cdot hm^{-2}$）；C_d为死亡有机质碳密度（$t \cdot hm^{-2}$）；C_t为生态系统总碳储量（t）；A_i为第 i 类土地利用总面积（hm^2）；n 为土地利用类型的总数。

2.2.2　碳密度

为更精确地估算广州市碳储量，采用 2021 年广州市森林资源清查资料的林班数据估算林地、灌木及草地的地上和地下生物量碳密度。地上生物量碳密度为单位面积的碳储量，碳储量通过生物量乘以含碳率（取 0.5）得出，不同林型的生物量运用材积源-生物量模型计算[11]（表 2），其中毛竹（*Phyllostachys edulis*）、杂竹、经济林和红树林的生物量参照叶金盛等[12]的研究，具体林地地上碳密度计算见公式（3）。参考 IPCC（2006），林地地下碳密度利用地上和地下的植物根茎比系数取 0.2 获得，草地和灌木的地上地下生物量碳密度模型参照周汝波等[13]的研究，土壤有机碳密度参考 2010 s 中国陆地生态系统碳密度数据集[14]0~100 cm 土壤有机质碳密度数据，死亡有机质碳密度参考叶金盛等[12]的研究并加以修

正，湿地碳密度参考唐志雄等[15]的研究，耕地、建设用地、水体的碳密度参照王春晓等[8]的研究，各土地利用类型碳密度数据见表 3。

表 2 不同林型生物量估算方程

林型	生物量模型
杉木[11,16]	$B=0.3999V+22.5410$
马尾松[11,16]	$B=0.5101V+1.0451$
湿地松[11,16]	$B=0.5168V+33.2378$
桉树[11,16]	$B=0.7893V+6.9306$
速生相思、其他软阔[17]	$B=2.1529V^{0.6085}$
黎蒴、其他硬阔[17]	$B=0.6573V^{1.0502}$
针叶混交林[12]	$B=0.5894V+24.5151$
针阔混交林[11,16]	$B=0.8019V+12.2799$
阔叶混交林[11,16]	$B=0.6255V+91.0013$

注：B 为植被生物量（$t \cdot hm^{-2}$）；V 为蓄积量（$m^3 \cdot hm^{-2}$）。

$$C_{f-a}=\sum_{j=1}^{n}(C_j \times A_j)/A_{f-t} \quad (3)$$

式（3）中：C_{f-a} 代表林地地上碳密度（$t \cdot hm^{-2}$）；C_j 为第 j 个林型的碳密度（$t \cdot hm^{-2}$）；A_j 为第 j 个林型的面积（hm^2）；A_{f-t} 为不同林型的总面积（hm^2）；n 为林型个数。

表 3 不同土地利用类型碳密度 $t \cdot hm^{-2}$

土地利用类型	地上生物量碳密度	地下生物量碳密度	土壤有机质碳密度	死亡有机质碳密度
林地[12,14]	35.1	7.02	99.0	4.71
灌木[12,14]	1.4	6.02	102.6	2.48
草地[12]	1.02	4.39	109.8	0.24
耕地[8]	13.5	2.7	30.63	0
建设用地[8]	1.2	0.93	12.48	0
水体[8]	0	0	0	0
湿地[15]	1.22	0.54	29.03	0.16

3 结果与分析

3.1 土地利用模拟结果精度验证

利用 2000—2010 年的用地变换预测 2020 年的土地利用类型，采用 Kappa 系数和 FOM 系数对 2020 年的模拟结果进行精度评估。当 Kappa 系数大于 0.7，FOM 系数大于 0.2 时，表示模拟结果一致性较好。模拟结果得到 Kappa 系数为 0.88，总体精度为 91.3%，FOM 系数为 0.38，表明 PLUS 模型所模拟的土地利用结果精度较好。

3.2 土地利用变化及碳储量空间格局

图 1、图 2 表明，林地和耕地是广州市土地利用的主体，均占总面积的 30%以上，但 2000—2020 年林地和耕地的面积呈现一个减少的趋势，2000—2010 年和 2010—2020 年耕地的降幅均超过林地，表明耕地受侵占程度大于林地。除耕地和林地之外，其他地类面积呈现上升趋势。其中，2000—2020 年建设用地面积增幅高达 87.9%，然而相较于 2000—2010 年，2010—2020 年的建筑用地面积增长势头有所放缓，说明该时期有效抑制了城市建设用地对耕地和林地的过度侵占。

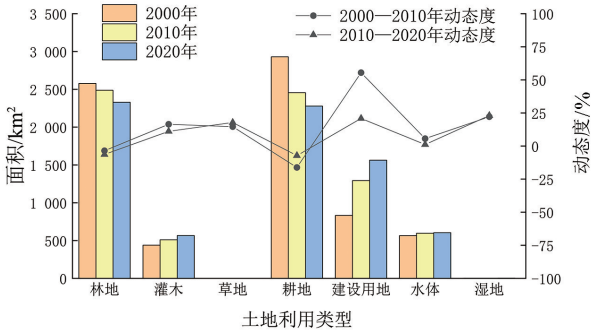


图 1 2000—2020 年土地利用类型面积及动态度

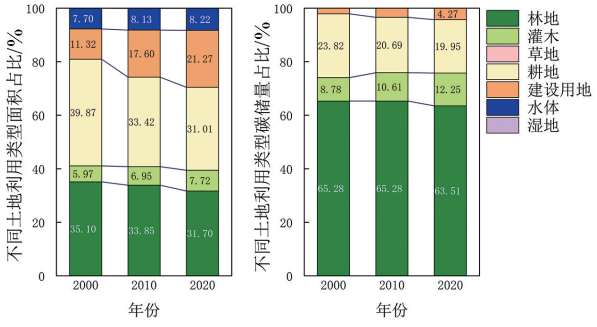


图 2 2000—2020 年土地利用类型面积及碳储量占比

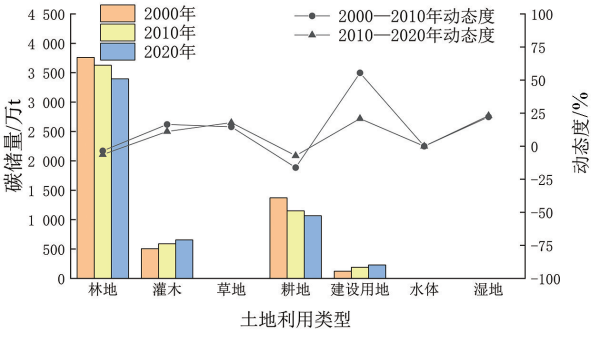


图 3 2000—2020 年土地利用类型碳储量及动态度

在碳储量方面（图 2～3），2000、2010 和 2020 年广州碳储总量分别为 5 761 万 t、5 556 万 t 和 5 349 万 t，2000—2020 年碳储量呈现下降趋势，总计下降 412 万 t，降幅达 7.2%，2010—2020 年下降速度较 2000—2010 年有所减缓。各类

土地利用类型的碳储量均表现为林地>耕地>灌木>建设用地>草地>湿地，林地和耕地的碳储量减少是广州市碳储总量下降的主要因素，2020 年较 2000 年分别下降了 9.7%和 22.2%，而建设用地因土地利用的扩张，实现了碳储量的增长，增幅为 46.8%，未来广州市碳储量的变化主要取决于城市建设用地与林地耕地之间的平衡，建设用地每向林地扩张 1 hm^2将损失 131 t 碳储量，向耕地扩张 1 hm^2将损失 32 t 碳储量。从空间上（图 4~5）看：碳储量高值地区主要集中在北部，这些区域山林覆盖面积广，生态基底较好，碳储量较为丰沛；碳储量中值地区集中在广州市南部，是碳储量减少比较显著的区域；碳储量的低值地区为广州市中部的城市建成区，城市扩张使大量用地转换为城市建设用地，该区域是碳储量减少最为显著的区域。

3.3　不同城乡梯度下碳储量影响因素

既有研究指出城市扩张是影响陆地生态系统碳储量的重要驱动因素[18]，为深入探究各影响因素对不同城乡梯度碳储量的影响强度，采用 Pearson 法进行相关性分析（表 4），在城区、市郊、市域 3 种城乡梯度下，与碳储量正相关的因素有 NDVI、DEM、坡度、年均蒸发量、年均降水量和土壤含水量，NDVI 为最主要的正相关影响因素，影响强度表现为市域>市郊>城区；与碳储量负相关的因素有年均气温、夜间灯光指数、GDP、路网密度，年均气温为最主要的负相关影响因素，影响强度表现为市域>城区>市郊。

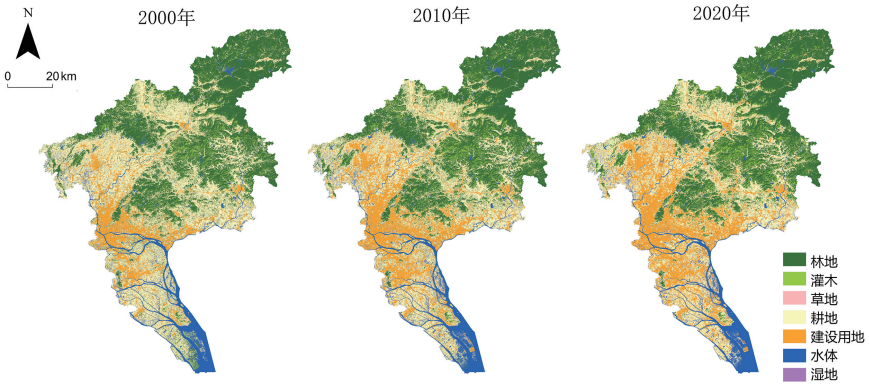


图 4　2000—2020 年广州市土地利用空间分布图

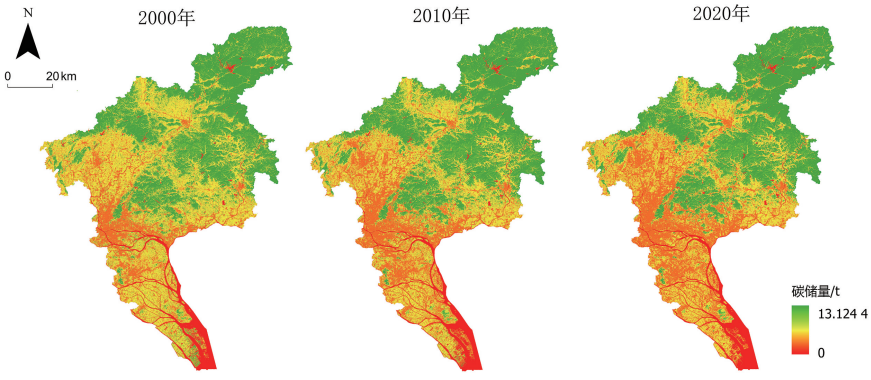


图 5　2000—2020 年广州市碳储量空间分布图

表 4　碳储量与不同影响因素的相关系数

项目	坡向	坡度	DEM	NDVI	人口密度	GDP	夜间灯光指数	年均降水量	年均蒸发量	年均气温	土壤含水量	到铁路距离	路网密度
城区碳储量	0.076	0.688	0.733	0.758	−0.289	−0.193	−0.483	0.505	0.520	−0.677	0.482	0.300	−0.286
市郊碳储量	0.202	0.662	0.620	0.761	−0.370	−0.435	−0.438	0.649	0.428	−0.676	0.369	0.305	−0.372
市域碳储量	0.178	0.675	0.629	0.779	−0.297	−0.249	−0.496	0.657	0.403	−0.683	0.376	0.152	−0.408

3.4 多情景模拟下土地利用及碳储量变化预测

基于 2020 年土地利用数据，利用 PLUS 模型模拟广州市 2030 年自然发展、经济优先以及综合发展 3 种情景下的土地利用情况及空间分布（图 6~8）。在 3 种情景下，广州市 2020—2030 年的土地利用变化趋势与 2000—2020 年基本一致，林地和耕地面积逐渐下降，建设用地及其他地类面积持续上升，但各类土地利用面积动态度均有所减缓。在模拟的 2030 年 3 种情景中，与 2020 年的实际土地利用相比，建筑用地面积的增幅表现为经济优先（18.45%）>自然发展（16.15%）>综合发展（11.38%），耕地及林地面积降幅表现为经济优先>自然发展>综合发展，综合发展情景下，2020—2030 年林地与耕地面积的降幅相较于 2010—2020 年的历史降幅均有所减少，降幅分别为 5.66%和 4.48%，相比之下，经济优先情景在同一预测期（2020—2030 年）内，林地和耕地面积降幅为 6.38%和 8.29%。

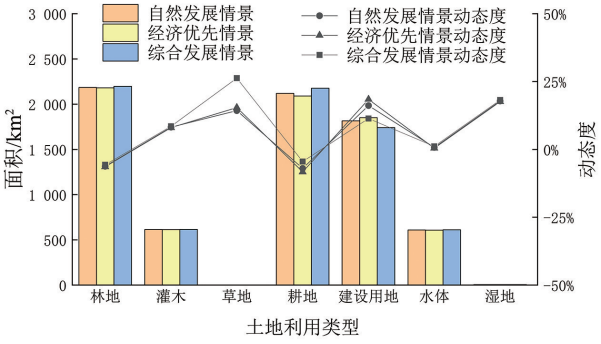


图 6 模拟 2030 年不同发展情景下土地利用类型面积及动态度

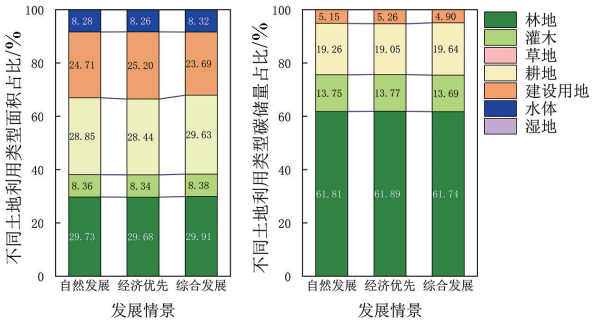


图 7 模拟 2030 年不同发展情景下土地利用类型面积及碳储量占比

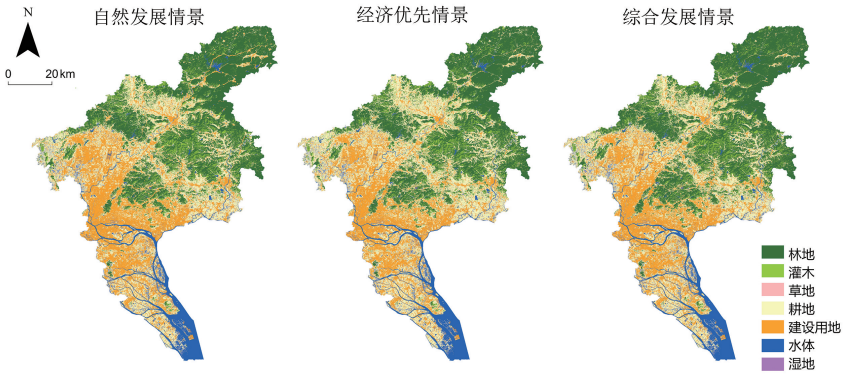


图 8 2030 年广州市不同发展情景下土地利用空间分布模拟图

在碳储量方面（图 7~9），2020—2030 年期间，3 种情景下的碳储量均呈现下降趋势，自然发展情景、经济优先情景和综合发展情景在 2030 年的碳储总量分别为 5 153 万 t、5 138 万 t 和 5 190 万 t，分别下降了 3.66%、3.94%和 2.97%。下降原因主要为林地和耕地两类土地利用类型的碳储量大幅减少。自然发展情景下，保持了以往的下降趋势；经济优先情景下，建设用地面积持续增加，导致了具有较高固碳能力的林地等用地受到侵占和破坏，其碳储量下降幅度最大；综合发展情景下，加大了对林地、耕地等用地的保护，

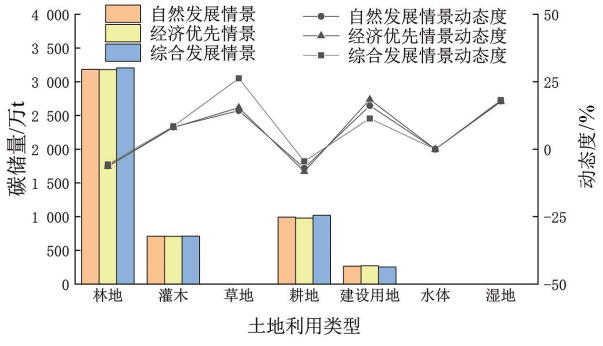


图 9 模拟 2030 年不同发展情景下土地利用类型碳储量及动态度

缓解了广州市内碳储量的下降趋势。3 种情景的碳储量空间分布（图 10）与 2000—2020 年基本一致，总体上呈现“北高南低”的空间分布特征，3 种情景的碳储量差异主要在于北部碳储量高值区域与南部碳储量低值区之间的用地转换。因此，增强对林地等具有较高碳密度用地的保护力度，通过科学实施空间规划、设立自然保护地、划定并严守三区三线等方式，能较好地维持城市空间下的碳固存功能。

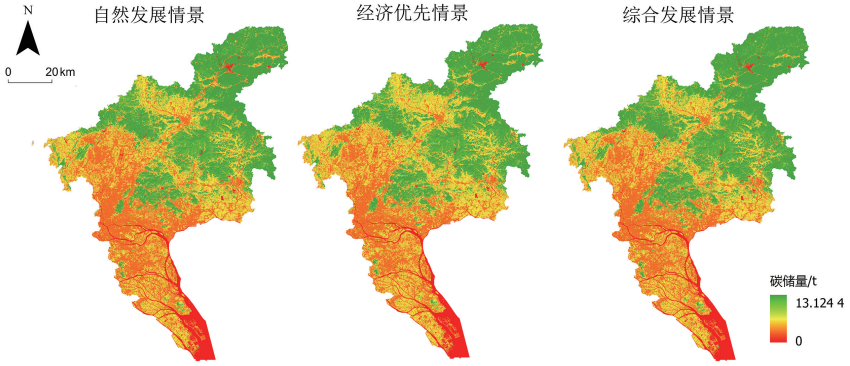


图 10　2030 年广州市不同发展情景下碳储量空间分布模拟图

4　讨论

本研究利用广州市森林资源清查数据估算广州市林地、灌木和草地的地上碳密度，数据结果更具有可靠性和合理性，与其他的研究结果相近[5]，然而估算的广州市碳储量高于周建等[19]的结果，可能是因为本研究仅考虑了城市森林地上碳储量部分，忽略了对土壤有机碳和死亡有机碳的估算。本研究仅将土地利用类型划分为林地、灌木和草地等 7 类，下一步应根据优势树种对林地进行细化分类，同时，本研究仅对林地、草地和灌木的地上碳密度进行估算，然而土壤的碳储量占整体碳储量的比重较大[20]，对土壤有机质碳储量的正确测定能更精确地估算广州市碳储量。

2000—2020 年广州市碳储量呈下降趋势，由于林地是生态系统碳储存的关键因素[21]，建设用地的扩张对林地造成的侵占成为广州市碳储量下降的重要原因。周汝波等[13]也认为区域内的林地和草地的转出是碳储量减少的关键因素，说明城市化程度与碳储量呈负相关关系。因此，在加强林地等用地保护的同时，要严格控制建设用地的疯狂扩张，应采取有效的生态保护措施以缓解这一下降趋势[22]。

按照经济优先情景下的土地利用变化趋势，预计到 2035 年，建设用地面积将接近《广州市国土空间总体规划（2018—2035 年）》所设定的 30%上限。因此，在未来土地利用规划中，应通过提高土地利用效率与集约度以满足经济发展的需求[23]。同时，在土地资源有限的约束下，提升林地这一地类的固碳质量是未来广州市增强碳储量的关键，应加强林地的保护和管理，着重保护和种植高储碳树种，并对残次林进行提质升级，开展森林质量优化提升管理，从而提升广州市碳储量水平，为应对气候变化做出积极贡献。

5　结论

1）2000—2020 年广州市土地利用整体动态度变化较剧烈，主要表现为耕地和林地向建设用地转化；碳储量呈不断下降趋势，但 2010—2020 年较 2000—2010 年下降趋势有所减缓；林地和耕地的变化直接影响整体碳储量的变化，建设用地每向林地扩张 1 hm^2将损失 131 t 碳储量，向耕地扩张 1 hm^2将损失 32 t 碳储量。2）在不同城乡梯度下，NDVI 都是影响碳储量的最主要正相关因素，年均气温为最主要的负相关因素。3）2030 年 3 种发展情景下，土地利用变化的动态度均有所减缓；3 种情景下碳储量都呈现下降趋势，其中综合发展情景下碳储量的下降程度最小；在空间上 3 种情景始终表现为北高南低的分布格局。

参考文献

[1]高志强,刘纪远,曹明奎,等.土地利用和气候变化对区域净初级生产力的影响[J].地理学报,2004,59(4):581-591.

[2]吴舒雁,朱庆林,翟焕锋.基于InVEST模型的广西茅尾海土地利用变化与碳储量评估[J].水土保持通报,2024,44(1):432-442.

[3]彭云妮,桑会勇,翟亮,等.基于InVEST模型的京津冀土地利用变化及碳储量时空分异研究[J].测绘通报,2024(1):19-24,31.

[4]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.

[5]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.

[6]郑慧玲,郑辉峰.基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测[J].环境科学,2024,45(4):2321-2331.

[7]徐彩瑶,任燕,孔凡斌.浙江省土地利用变化对生态系统固碳服务的影响及其预测[J].应用生态学报,2023,34(6):1610-1620.

[8]王春晓,邓孟婷,汪雪飞,等.基于PLUS-InVEST模型的碳储量时空演变与预测模拟[J].中国园林,2024,40(6):70-76.

[9]杨学亮,谢旻珂,张云路,等.城市化对城乡生态空间碳储量的影响机制:以北京市为例[J].中国城市林业,2023,21(6):98-105,142.

[10]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.

[11]方精云,刘国华,徐嵩龄.我国森林植被的生物量和净生产量[J].生态学报,1996,16(5):497-508.

[12]叶金盛,佘光辉.广东省森林植被碳储量动态研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2010,34(4):7-12.

[13]周汝波,林媚珍,吴卓,等.珠江西岸生态系统碳储量对土地利用变化的响应[J].生态科学,2018,37(6):175-183.

[14]徐丽,何念鹏,于贵瑞.2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[J].中国科学数据(中英文网络版),2019,4(1):90-96.

[15]唐志雄,宁荣荣,王德,等.黄河三角洲滨海湿地碳储量及其对未来多情景的响应[J].生态学报,2024,44(8):3280-3292.

[16]FANG J Y,GUO Z D,PIAO S L,et al.Terrestrial vegetation carbon sinks in China,1981-2000[J].Science in China,2007,50(9):1341-1350.

[17]黄从德,张健,杨万勤,等.四川森林植被碳储量的时空变化[J].应用生态学报,2007,18(12):2687-2692.

[18]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.

[19]周健,肖荣波,庄长伟,等.城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果:以广州为例[J].生态学报,2013,33(18):5865-5873.

[20]解宪丽,孙波,周慧珍,等.中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J].土壤学报,2004,41(1):35-43.

[21]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].Journal of Cleaner Production,2020,252:119659.

[22]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.

[23]鲁达非,江曼琦.中国城市"三生"空间高质量建设目标内涵解析[J].河北学刊,2024,44(3):147-156.