

# 基于 FLUS-InVEST 模型的北部湾城市群生态空间 碳汇演变模拟及驱动因素研究

赵胤程<sup>1</sup>, 覃盟琳<sup>1,2</sup>, 庞雅月<sup>2</sup>, 王政强<sup>2</sup>, 史倩倩<sup>1</sup>

(1.广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2.广西大学 林学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** [目的] 探究未来湾区城市群生态空间变化对碳汇的影响, 找出变化背后的主要驱动因素, 为城市群制定未来生态空间发展方向与策略提供参考, 促进陆海新通道的科学开发。[方法] 以北部湾城市群为例, 基于 2010, 2015 与 2020 年土地利用数据, 使用 GeoSOS-FLUS 模型预测生态优先、耕地优先及城镇优先 3 种不同预设情境下 2035 年的北部湾城市群生态空间土地利用格局, 使用 InVEST 模型对 2020—2035 年各情景下生态空间碳汇变化情况进行分析, 使用地理加权回归找出影响土地碳汇变化的主要驱动因素。[结果] 生态优先导向下 2020—2035 年北部湾城市群碳储量有所增加; 城镇优先导向下碳储量降低较多, 达到  $3.12 \times 10^6$  t。坡度、人口密度和高程是城市群生态空间碳汇格局最重要的影响因素, 城镇空间扩张是变化的主因。生态优先情景下, 生态空间的土地将有所增加。[结论] 生态优先导向能兼顾城镇发展与生态空间的环境保护需求, 城镇优先导向和农业优先导向会大幅降低碳汇。另外政策措施也需尽早制定以抑制城镇空间扩张。

**关键词:** GeoSOS-FLUS 模型; InVEST 模型; 碳汇模拟; 碳储量; 北部湾城市群

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)03-0345-11

**中图分类号:** X82

**文献参数:** 赵胤程, 覃盟琳, 庞雅月, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的北部湾城市群生态空间碳汇演变模拟及驱动因素研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 345-355. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.043; Zhao Yincheng, Qin Menglin, Pang Yayue, et al. Evolution simulation and driving factors of eco-spatial carbon sinks in Beibu Gulf urban agglomeration based on FLUS-InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 345-355.

## Evolution Simulation and Driving Factors of Eco-spatial Carbon Sinks in Beibu Gulf Urban Agglomeration Based on FLUS-InVEST Model

Zhao Yincheng<sup>1</sup>, Qin Menglin<sup>1,2</sup>, Pang Yayue<sup>2</sup>, Wang Zhengqiang<sup>2</sup>, Shi Qianqian<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning,

Guangxi 530004, China; 2. College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

**Abstract:** [Objective] The impact of future changes in the ecological space of urban agglomerations in the bay area on carbon sinks were analyzed, and the driving factors behind the changes were identified in order to provide a reference for future ecological space development direction and strategies for urban agglomeration, and promote scientific development of new land-sea corridors. [Methods] The GeoSOS-FLUS model was used to predict the ecological space land use pattern of the Beibu Gulf urban agglomeration in 2035 under three different scenarios (ecological priority, agricultural priority, and urban priority) based on land use data in 2010, 2015, and 2020. Changes in the spatial distribution of ecological carbon storage between 2020 and 2035 were analyzed using the InVEST model. Geographic weighted regression was used to identify the main drivers of change affecting land carbon sinks. [Results] Carbon storage in the Beibu Gulf urban agglomeration increased under the ecological priority orientation from 2020 to 2035. Carbon storage decreased more under the urban priority, reaching  $3.12 \times 10^6$  tonnes. Slope, population, and elevation were the most important factors influencing the eco-spatial carbon sink pattern of the urban agglomeration, and the spatial expansion

收稿日期: 2021-09-22

修回日期: 2021-12-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“北部湾城市群空间协同发展低碳效应及规划研究”(51768001)。

第一作者: 赵胤程(1996—), 男(汉族), 河北省秦皇岛市人, 硕士研究生, 研究方向为低碳规划设计。Email: zhaoyincheng08@163.com。

通信作者: 覃盟琳(1978—), 男(壮族), 广西壮族自治区南宁市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事低碳规划设计研究。Email: XDrenju@163.com。

of towns was the main cause of changes. Ecological space will increase under the ecological priority scenario. [Conclusion] Ecological priority orientation can balance the needs of urban development and ecological space protection, while urban development priority and agricultural priority orientations can significantly reduce carbon sinks. In addition, policy measures need to be developed as soon as possible to curb urban spatial expansion.

**Keywords:** Geo-SOS model; InVEST model; carbon sinks simulation; carbon storage; Beibu Gulf urban agglomeration

随着中国“双碳”目标的确立,城市群碳平衡问题日趋重要。城市群生态空间提供着多种生态系统服务,是城镇与农业空间可持续发展的保障,对区域碳平衡起到关键作用。城镇扩张导致生态空间景观格局变化加剧,生态恶化,抗风险能力降低,生态空间碳汇下降<sup>[1-3]</sup>,城市发展与生态保护的矛盾加深,碳失衡风险增加。为了防范碳失衡,提升区域碳汇的预测能力,通过生态空间土地利用格局的多情景模拟,可预测不同发展导向下区域土地覆盖变化及区域碳汇演变状况,为未来生态空间土地利用管理决策提供科学参考<sup>[4]</sup>。

实现碳汇空间分布格局的预测需要基于土地类别的空间模拟分析,对城市群生态空间格局变化的预测需要精确度较高的模拟技术,以数学模型为基础的土地利用模拟模型近年来快速发展,能呈现较准确的预测结果<sup>[5]</sup>。随着模拟模型多次迭代,各领域研究者根据不同的学科理论构建了土地利用模拟模型<sup>[6]</sup>,包括专注数据的统计模型,重视空间布局的元胞自动机模型,以及重视演变过程的经济学模型与多主体模型等。其中以元胞自动机模型为基础的衍生模型在土地利用格局演变分析中运用广泛,研究者以此开发的模型包括 CLUE-S 模型<sup>[7-8]</sup>、SLEUTH 模型<sup>[9-10]</sup>、CA-Markov 耦合模型<sup>[11]</sup>以及更多使用机器学习、多准则评价(MCE)、粒子群算法(PSO)等技术与元胞自动机模型相耦合的模拟模型<sup>[12-14]</sup>。随着神经网络模型的应用取得进展,其耦合模型的优势也在土地利用模式与驱动力两者关系的发掘上显现,兼顾了自然生态效应与人类活动。刘小平等<sup>[15]</sup>结合人工神经网络(ANN)、元胞自动机模型(CA)与马尔可夫链(Markov chain)的优势,建构了 FLUS(future land use simulation)耦合模型,该模型具有自适应惯性及竞争机制,可处理不同地类竞争与相互作用的问题,反映土地变化的不确定性,并消除了 CA 模型不能直接计算未来期限内元胞增长数量的劣势。在应用层面,朱寿红等<sup>[16]</sup>研究表明,FLUS 模型模拟精度比 CLUE-S 模型和 ANN-CA 模型更高。目前 FLUS 模型主要应用在城镇增长边界划定<sup>[17]</sup>、区县级尺度多情景模拟<sup>[18]</sup>领域,对城市群尺度的土地利用格局模拟及碳汇相关模拟研究较少。

由于城市群中城镇扩张必然会导致一系列生态平衡的改变,而城市群生态空间的碳汇演变能够准确反映生态失衡导致的气候变化,是反映生态环境效益的重要指标之一。当前学者对碳汇的研究主要集中在碳汇动态模拟<sup>[19]</sup>以及碳汇与气候间的关系分析<sup>[20]</sup>上,采用的碳汇量计算模型包括 TVP 模型<sup>[21]</sup>、CASA 模型等<sup>[22]</sup>。在城市群碳汇相关分析中,对碳汇变化的动因分析研究较少。InVEST 模型的优势是能够衡量某时间段内生态空间不同地类在研究时段内的碳汇量变化情况,碳储量分类较细,有助于深入理解生态空间格局演变对碳汇演变的影响及背后的驱动机制,该模型在生境质量评估、土壤保持、水源供给等<sup>[23-26]</sup>领域的研究成果相对丰富,其陆地生态系统模块的碳储量模块能够计算一段时间内碳汇变化。对 2020—2035 年不同情景的北部湾城市群碳汇模拟能够反映该区域的碳汇演变情况,找到碳汇演变的驱动力因素。

近年区域经济高速发展使景观格局剧烈变化,城镇扩张给生态环境带来压力,为应对碳失衡风险,城市群生态空间演变需要科学预测与保护。目前 FLUS 模型与 InVEST 模型结合的研究成果较少,且对城市群尺度碳汇格局变化的模拟研究及碳汇空间格局演变的驱动力因素研究也相对缺乏。因此研究以北部湾城市群为例,以 2010,2015,2020 年为基准年模拟 2035 年城市群景观格局时空演变,并分析研究期内的碳汇变化,找到影响碳汇变化的主要驱动因子,为城市群未来生态空间发展方向与策略提供参考,促进陆海新通道的科学开发。

## 1 研究区概况

北部湾城市群地处华南地区,陆地被北部湾海域分隔成 3 部分,包括广西壮族自治区的 6 个地级市:南宁、北海、钦州、防城港、玉林和崇左,广东省的 3 个地级市:湛江、茂名和阳江,海南省的 6 个地(县)级市:海口、儋州、东方、澄迈、临高和昌江。其详细分布见图 1。研究区毗邻粤港澳与东盟,属亚热带季风气候与热带季风气候,降水多,日照充足,陆地面积约  $1.17 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,是中西部地区快速崛起的城市群之一,也是西部陆海新通道的战略出海口。

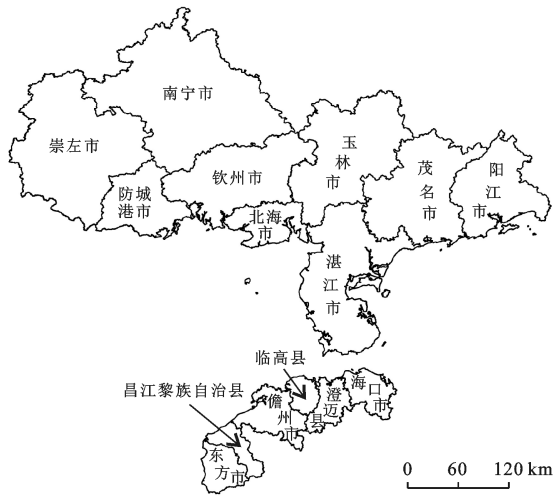


图 1 北部湾城市群地区分布

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

研究使用的数据集一共分为土地利用、政策约束、道路、地形、经济 5 类。北部湾城市群 2010、2015 与

2020 年 3 期土地利用现状数据来自武汉大学杨杰等<sup>[27]</sup>制作的基于 Landsat 土地利用分类数据,针对生态空间的研究需要将土地利用类型分为建设用地、耕地、林地、草地、水域、未利用地 6 大地类。根据相关国家标准与研究需求,将林地、草地、水域、未利用地这 4 个以自然环境和生态服务为主的地类定义为生态空间。

研究根据北部湾城市群发展现状选取与土地利用格局演变有较大联系的指标进行综合分析。主要从自然条件和社会经济两方面来选取驱动因子,自然条件方面主要选取了高程、坡度、坡向、距水系距离、距铁路距离、距高速公路距离、距一般道路距离、距城镇中心距离共 8 个因子。其中高程和坡度是决定土地利用格局变化的地形因素,较短的交通距离是吸引城镇用地开发的必要条件。社会经济方面选择夜间灯光、人口密度共 2 个因子。为了约束模拟扩张还需要生态保护方面的限制因子,选取自然保护区、河流、重要湿地、红树林、热带雨林、天然林共 6 个因子。数据来源信息见表 1。

表 1 数据来源信息

数据类型	数据内容	年份	数据来源	数据描述
土地利用数据	土地利用现状	2010	CLCD 年度土地覆盖数据集	空间分辨率为 1 km, 根据需求进行地类合并, 进行初始条件输入与模型精度验证
		2015	<a href="https://zenodo.org/record/5210928#.Yd-NQN-FBxPZ">https://zenodo.org/record/5210928#.Yd-NQN-FBxPZ</a>	
		2020		
限制转化/ 政策约束数据	重要湿地分布	2019		矢量数据集, 做约束条件
	自然保护区	2019		
	红树林分布	2019	ArcGIS Online	
	热带雨林分布	2019	<a href="http://www.ArcGISonline.cn/">http://www.ArcGISonline.cn/</a>	
	天然林分布	2019		
道路数据	道路网络	2020	Open Street Map	矢量数据集, 反映交通驱动力
			<a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a>	
地形数据	数字高程模型	2019	NASA ASTER GDEM v3	空间分辨率为 30 m, 经栅格处理后为 1 km, 栅格数据集, 限制地形条件, 单位为 m
			<a href="https://earthdata.nasa.gov/">https://earthdata.nasa.gov/</a>	
经济数据	人口密度	2020	Worldpop <a href="https://www.worldpop.org">https://www.worldpop.org</a>	空间分辨率为 1 km, 单位为人/km <sup>2</sup>
	夜间灯光	2019	珞珈一号 01 星夜间灯光数据 <a href="http://59.175.109.173:8888/app/login.html">http://59.175.109.173:8888/app/login.html</a>	空间分辨率为 130 m, 经栅格处理后为 1 km, 原数据经辐射定标处理, 反映城市扩张和竞争力

### 2.2 研究方法

2.2.1 研究步骤 研究分为 3 部分: ①使用 Markov 模型对 2035 年土地需求量进行预测, 随后使用 FLUS 模型对北部湾城市群 2035 年生态优先、耕地优先及城镇优先 3 种发展情景下土地利用格局的发展方向进行模拟; ②利用 InVEST 模型对 2020—2035 年 3 种情景下的区域土地碳汇情况进行分析; ③使用地理加权回归模型对不同情景下土地利用格局变化驱动因子进行权重分析, 找出各场景下推动区

域碳汇格局变化的主要影响因素。

2.2.2 生态空间模拟预测 FLUS 模型是一款研究自然与人类活动影响下土地利用或土地覆盖的情景仿真预测模型, 该模型基于元胞自动机模型并进行改进, 引入了多层前馈人工神经网络算法(BP-ANN)提升模拟的精确性。

研究模型首先利用土地现状数据, 使用 Markov 链对 2035 年多情景土地需求量进行预测, 然后采用多层前馈人工神经网络算法处理非线性问题, 使用土

地利用数据与驱动因子来计算各土地利用类型的转换概率,随后结合邻域影响因子、自适应惯性系数和转换成本得到栅格总体转换概率,再运用基于轮盘赌的自适应惯性竞争机制解决不同地类相互竞争的不确定性,从而得到模拟结果。

(1) 多层前馈人工神经网络算法原理。BP-ANN 算法的基本结构由一个输入层、若干隐层与一个输出层组成,其公式表达<sup>[15]</sup>为:

$$\begin{aligned} \text{sp}(p, k, t) &= \sum_j \omega_{j,k} \times \text{sigmoid}[\text{net}_j(p, t)] \\ &= \sum_j \omega_{j,k} \times \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_j(p, t)}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\text{sp}(p, k, t)$  为第  $k$  种用地类型在栅格  $p$  及时间  $t$  的适宜性概率;  $\omega_{j,k}$  是隐层与输出层间的权值;  $\text{sigmoid}$  函数是隐层到输出层的激励函数;  $\text{net}_j(p, t)$  表示在第  $j$  个隐层栅格  $p$  在时间  $t$  接收的信号; BP-ANN 输出的适宜性概率  $\text{sp}(p, k, t)$  在迭代时间  $t$  栅格  $p$  上, 各类用地适宜性概率的和恒定为<sup>[15]</sup>:

$$\sum_k \text{sp}(p, k, t) = 1 \quad (2)$$

研究中神经网络获取训练样本的采样方法为随机采样,其特点是各类用地采样点数随各地类所占比例而变化,隐层数量设置为 13 层,并将土地利用驱动因子栅格数据归一化处理后输入到 BP-ANN 模型中得出研究区内各类用地的适宜性概率。

(2) 自适应惯性系数。自适应惯性系数是自适应惯性竞争机制的核心,由各地类现状数量与需求决定并在迭代中自适应调整使各地类数量向目标发展,第  $k$  种地类在  $t$  时刻的自适应惯性系数  $\text{Inertia}_k^t$  为<sup>[15]</sup>:

$$\text{Inertia}_k^t = \begin{cases} \text{Inertia}_k^{t-1} & (|D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}|) \\ \text{Inertia}_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & (0 > D_k^{t-2} > D_k^{t-1}) \\ \text{Inertia}_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} & (D_k^{t-1} > D_k^{t-2} > 0) \end{cases} \quad (3)$$

表 3 FLUS 模型转换成本矩阵

项目	城镇优先						耕地优先						生态优先						
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	
土地类型来源	A	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
	B	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	C	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
	D	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
	E	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	F	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注: A, B, C, D, E, F 分别表示耕地、林地、草地、水域、建设用地区和未利用地; 1 表示可以转换, 0 表示不可转换。

(5) 总体转换概率与模型验证。利用 BP-ANN 模型计算出每个栅格  $p$  转换为  $k$  的概率, 使用元胞自

式中:  $D_k^{t-1}, D_k^{t-2}$  分别为  $t-1, t-2$  时刻第  $k$  种用地类型的栅格数与需求数量之差。

(3) 邻域影响因子与权重。  $\Omega_{p,k}^t$  为栅格  $p$  在  $t$  时刻的邻域影响因子, 反映不同土地利用类型及邻域范围内不同用地单元间的相互作用, 其公式<sup>[15]</sup>为:

$$\Omega_{p,k}^t = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times \omega_k \quad (4)$$

式中:  $\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)$  表示在  $N \times N$  的 Moore 邻域窗口中, 上轮迭代结束后第  $k$  种土地类型的栅格总数,  $\omega_k$  为各类用地类型邻域作用的权重, 范围在 0~1 之间。本研究中  $N = 3$ , CA 迭代次数为 300。根据过往研究经验与土地特征, 参考 FLUS 使用说明, 建设用地扩张能力最强, 林地扩张能力最弱, 分别设为 1, 0.01, 由于人与自然的共同作用, 未利用地扩张能力适中, 因此权重设置适中, 设为 0.5, 经过比对,  $\omega_k$  参数由大到小依次排列为建设用地、未利用地、水域、草地、耕地、林地, 详细赋值见表 2。

表 2 FLUS 模型邻域作用权重

土地利用类型	建设用地	未利用地	水域	草地	耕地	林地
邻域作用权重	1	0.5	0.4	0.3	0.2	0.01

(4) 转换成本。转换成本表示现状土地类型转换为目标类型的难度。针对 3 种不同的发展情景, 需要根据经验设置 3 种转换成本。详细转换情况见表 3。转换的总体原则是除少数地类外, 高等级土地不可向低等级土地转换。生态优先情境下依据土地类型生态效益进行等级排序的结果为林地、水域、草地、未利用地、耕地、建设用地区; 城镇优先情境下根据城市发展需求进行等级排序的结果为建设用地、耕地、林地、草地、水域、未利用地; 耕地优先情境下, 除建设用地区外其他用地均可转为耕地, 其他条件与城镇优先情景类似。

动机模型进行迭代, 将各用地类型分配到栅格中。栅格  $p$  在  $t$  时刻转化为用地类型  $k$  的总体转换概率



$Tp_{p,k}^t =$  的公式<sup>[15]</sup>为:

$$Tp_{p,k}^t = sp(p, k, t) \times \Omega_{p,k}^t \times \text{Inertia}_{p,k}^t \times (1 - sc_{c \rightarrow k}) \quad (5)$$

式中:  $sc_{c \rightarrow k}$  为土地利用类型  $c$  转为  $k$  的转换成本,  $(1 - sc_{c \rightarrow k})$  表示发生转化的难易程度。

为确保模型的有效性, 研究使用 kappa 指数、总体精度 OA 及 FOM 系数对模型的精确度进行检验, 通过采集历史数据进行模拟验证。当  $kappa \geq 0.75$  时, 模型模拟精确度较高, 当 kappa 介于 0.5 与 0.75 之间时, 模型模拟精确度一般<sup>[28]</sup>。总体精度越接近 1, 模拟精确度越高。FOM 指数受模拟期限影响, 每增加一年, FOM 指数增加不超过 0.01 为标准水平。

(6) 模型操作及结果。将 2015 年北部湾城市群土地利用现状数据作为初始数据, 对各驱动因素进行归一化处理并使用随机采样提取栅格数据样本训练 ANN 模型, 采样率设置为 2%, 计算各地类的适宜性概率, 然后将惯性系数设为 1, 将各土地利用类型的适宜性概率及限制因子图层导入至模型中, 得到各地类的 CA 参数, 对城镇优先情境下 2020 年北部湾城市群土地利用情况进行模拟, 并使用 kappa 指数等精度验证方法将模拟结果与 2020 年真实土地利用情况进

行对比验证。详细的精度验证结果见表 4。其中 kappa 系数大于 0.75, OA 计算结果较高, FoM 系数处于标准水平。综上所述, FLUS 模型对北部湾城市群未来土地利用模拟的精确度较高, 能够较好地反映土地的变化情况。

表 4 FLUS 模型的 kappa 指数, OA 及 FoM 系数

kappa	FoM	OA
0.829	0.026	0.911

随后使用 FLUS 对 2035 年北部湾城市群不同情景下的土地利用变化进行模拟, 观察其生态空间的变化情况。由于自然保护区、生态湿地、天然林、红树林、热带雨林及水域等政策保护区域需要限制发展, 3 种情景都加入了限制区。根据不同情景地类发展优先度模拟后的结果见图 2。由图 2 可知, 北部湾城市群的生态空间主要分布在两广交界地带与桂西南山区。总体上, 2035 年北部湾城市群生态空间在生态优先的情景下发展呈扩大趋势, 在城镇优先和耕地优先情景下呈缩小趋势, 不同场景之间变动较大的区域主要在大、中型城市周边, 情况与城市群发展阶段特征相符。详细地类变动情况见表 5。

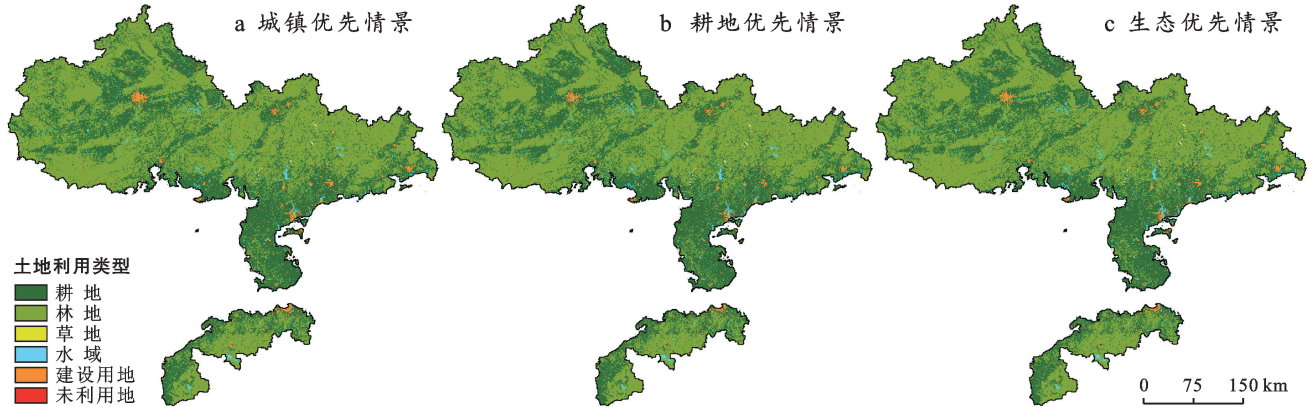


图 2 北部湾城市群 2035 年各情景模拟结果

表 5 北部湾城市群 2020 年土地利用现状与 2035 年各情景模拟情况

情景	城镇空间		农业空间		生态空间					
	建设用地面积/km <sup>2</sup>	比例/%	耕地面积/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	比例/%	林地面积/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	草地面积/km <sup>2</sup>	水域面积/km <sup>2</sup>	未利用地面积/km <sup>2</sup>	生态空间总面积/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	比例/%
2020 年现状	2 817	2.43	4.35	37.43	6.74	89	2 392	3	6.99	60.15
2035 年城镇优先	2 854	2.46	4.40	37.86	6.68	95	2 371	1	6.93	59.68
2035 年耕地优先	2 482	2.14	4.40	37.86	6.70	74	2 595	1	6.97	60.00
2035 年生态优先	2 552	2.20	4.30	37.03	6.78	91	2 703	1	7.06	60.77

2.2.3 驱动因子分析 地理加权回归模型是一种加入空间维度的回归分析模型, 可用于土地利用变化情景预测领域。通过地理加权回归分析可得到各个参

与运算自变量的影响权重, 从而掌握因变量主要受哪些自变量的影响, 并能够根据自变量权重大小判断自变量对因变量的影响程度。由于碳汇变化与土地地

类变化深度相关,模型选取驱动因子数据与各地类适宜性概率进行土地利用变化驱动力研究,分析驱动因子与土地格局的关系,发现碳汇变化的主要驱动力。地理加权回归模型的表达式<sup>[29]</sup>为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{i=1}^k \beta_i(u_i, v_i)x_{ik} + \epsilon_i \quad (6)$$

式中: $u_i$  和  $v_i$  分别为  $i$  点的位置坐标;  $\beta_0(u_i, v_i)$  为回归系数;  $\epsilon$  为残差;  $x$  为自变量;  $y$  为因变量。在回归分析结果中,因子的拟合优度  $R^2$  是体现因子影响程度的重要参数,可用于解释碳汇格局变化驱动因子的影响力。

**2.2.4 碳汇变化分析** InVEST 模型全称“生态系统服务功能与权衡交易综合评价模型”,能实现生态系统服务功能的定量评估和空间可视化。模型包括海洋生态系统、淡水生态系统和陆地生态系统 3 个模块,用户可以根据需求对相应模块输入数据与相应参数得到评估结果。由于土地管理人员需要在何处保护或开发做选择,这些评估模块将是进行生态系统服务决策的理想支持工具。

研究所需模块是位于陆地生态系统模块下的碳储量模块,该计算模块是基于碳密度方法建立的。其计算原理为,模型使用土地利用类型、木材采伐量、采伐产品降解率和四大碳库的碳储量来估算现状碳储量或一段时间内的碳汇,其中四大碳库包括地上生物量、地下生物量、土壤有机物和死亡有机物。碳储量计算公式<sup>[30]</sup>如下:

$$C_i = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (7)$$

式中: $C_i$  为某地类  $i$  的碳密度( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $C_{\text{above}}$ ,  $C_{\text{below}}$ ,  $C_{\text{soil}}$ ,  $C_{\text{dead}}$  分别是地上生物碳密度、地下生物碳密度、土壤有机物碳密度、死亡有机物碳密度。考虑到死亡有机物对生态系统碳库的影响很小且数据收集较困难,将死亡有机物排除在研究范围外。研究根据生态空间的研究需求和不同地类的碳密度值计算各地类的碳储量之和  $T_c$ ,公式<sup>[31]</sup>如下:

$$T_i = C_i \times A_i \quad (8)$$

$$T_c = \sum_{i=1}^n T_i \quad (9)$$

式中: $T_c$  为总碳储量( $\text{t}$ );  $T_i$  是地类  $i$  的碳储量,区域共有  $n$  种地类;  $C_i$  指地类  $i$  的碳密度( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $A_i$  为地类  $i$  的面积( $\text{hm}^2$ )。将 2035 年各场景的碳储量计算结果与 2020 年相减可得到 15 a 内总碳汇量与各地类的碳汇量,从中了解碳汇变化情况。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态空间格局演变多情景模拟对比

在城镇优先情景中,建设用地为主导土地利用类

型,在 2020—2035 年建设用地代表的城镇空间占比由 2.43% 上升到 2.46%,而耕地代表的农业空间占比由 37.43% 上升到 37.86%,其他 5 类用地代表的生态空间占比由 60.15% 下降至 59.68%。上述变化反映了城镇优先导向下,建设用地扩张使生态空间受挤压,生态质量因此下降。其中受影响较大的区域为各城镇的边缘区和城区内部,以南宁、湛江、海口城镇空间变化最为明显,主要侵蚀城镇周围的农业空间及城区水域;生态空间主要受农业空间侵蚀,侵蚀区域主要分布在桂西南与雷州半岛的耕地集中区。在模拟中,各个中心城市城区内部的城镇空间扩张幅度较大,城区内部的水域、耕地和林地被建设用地挤占,因此在城镇优先情景下各城市的中心城区需要进行建设管控以防止城区内部生态失衡。

在耕地优先情景中,发展以耕地开拓为导向,模型提高了除建设用地外其他用地类型向耕地转移的概率和耕地转为其他用地类型的成本。在 2020—2035 年耕地所代表的农业空间占比由 37.43% 上升到 37.86%,而城镇空间由 2.43% 下降至 2.14%,而生态空间由 60.15% 下降至 60.00%。农业空间获得良好保护和发展,但生态空间会受到农业空间的挤压,城镇空间也无法获得足够的土地进行经济建设。土地类型变化的区域主要分布在雷州半岛、海南岛和桂西地区的耕地集中区,以耕地侵蚀草地和中心城市建设用地为主。因此,保证农业空间的发展会影响生态空间,挤占城镇发展空间,牺牲生态环境,使局部气候恶化。

在生态优先情景中,生态保护成为发展导向,一切以生态环境保护为前提,提高了生态空间用地类型向其他用地的转换成本。在 2020—2035 年生态空间占比由 60.15% 扩大至 60.77%,城镇空间由 2.43% 下降至 2.20%,而农业空间由 37.43% 下降至 37.03%。生态空间得到保护,中心城市城镇空间稍有缩小,耕地面积大幅下降,除雷州半岛耕地仍在扩张外,其他地区的耕地逐渐变为生态空间。在本情景中,生态空间增长较多。

综上所述,城镇优先情景下生态空间缩小程度最高,对生态空间的破坏最严重,而生态优先情景下生态空间有所增加,同时对城镇空间的经济建设负面影响较小。只有严格限制侵占生态空间,才有可能保证城市群经济的可持续发展。

### 3.2 生态空间碳汇情况分析

**3.2.1 碳汇时空变化特征分析** 方精云等<sup>[32]</sup>研究表明同一气候带土地利用类型碳密度差异较小,因此使用已有研究得出的相似气候区土地利用类型碳密度

表进行碳汇情况分析,最终参照朱志强等<sup>[33]</sup>测定的碳密度,以表6作为碳密度标准。

表6 北部湾城市群土地利用类型碳密度标准 t/hm<sup>2</sup>

土地利用类型	地上部分碳密度	地下部分碳密度	土壤部分碳密度
耕地	13.50	2.70	17.34
林地	58.30	14.58	19.73
草地	3.01	13.53	16.00
水域	0.21	0.00	0.00
建设用地	1.20	0.93	12.48
未利用地	2.10	0.00	11.36

参照碳密度表对北部湾城市群碳密度时空分布情况进行详细分析。详细的北部湾城市群碳储量与平均密度见表7。在时间维度,北部湾城市群总碳储量从2010年的 $7.75 \times 10^8$  t下降至2020年的 $7.74 \times 10^8$  t,城市群碳储量的平均密度由2010年的 $6.67 \text{ kg/m}^2$ 下降至2020年的 $6.66 \text{ kg/m}^2$ 。2015—2020年碳储量与平均密度呈下降趋势,与2010—2015年的碳储量与平均密度发展趋势相反,植被或土壤中的碳被释放到空气中,造成气候环境恶化。由表8可知,2010—2015年碳储量增加 $1.20 \times 10^6$  t,2015—2020年碳储量减少 $1.77 \times 10^6$  t,而2010—2015年生态空间面积增加 $94 \text{ km}^2$ ,2015—2020年生态空间面积减少 $686 \text{ km}^2$ ,上述数据表明,2015—2020年碳储量流失比2010—2015年加重与生态空间面积减少有一定关系。

从空间分布情况来看,北部湾城市群碳储量存在

明显的地区分布差异。由图3可知,碳储量集中在粤西及桂东南区域,碳汇较强的城市主要为防城港、崇左、钦州、玉林、茂名和阳江。碳汇演变与土地利用类型有强相关性。上述6市的林地面积在北部湾城市群位居前列。碳汇较低的城市主要为南宁、湛江、海口、北海、东方和临高市。上述6市建设用地及耕地面积占比较大,影响了区域碳储量的积累。根据表9中的2020年现状数据,北部湾城市群各城市的碳密度排名由高到低为:防城港、玉林、崇左、澄迈、钦州、阳江、茂名、昌江、儋州、临高、南宁、东方、海口、北海、湛江,其中防城港、玉林、崇左、澄迈、钦州、阳江、茂名、昌江、儋州、临高碳密度高于平均密度,其他城市碳密度低于平均密度。另外,如图4所示,2010—2015年土地碳密度变化较剧烈的区域集中在南宁、湛江和海口等市域范围,雷州半岛和海口碳汇减少较严重,2015—2020年碳密度变化相比前五年更广泛和均衡,碳汇减少的区域集中在城市群北部,碳汇增加的区域集中在雷州半岛。

表7 2010—2020年北部湾城市群碳储量与平均密度

年份	碳储量/t	平均密度/(kg·m <sup>-2</sup> )
2010	$7.75 \times 10^8$	6.67
2015	$7.76 \times 10^8$	6.68
2020	$7.74 \times 10^8$	6.66

表8 北部湾城市群碳汇与生态空间面积变化

年份	碳汇变化/t	生态空间面积变化/km <sup>2</sup>				
		林地	草地	水域	未利用地	总体变化
2010—2015	$+1.20 \times 10^6$	+248	+3	-156	-1	+94
2015—2020	$-1.77 \times 10^6$	-359	-26	-302	+1	-686

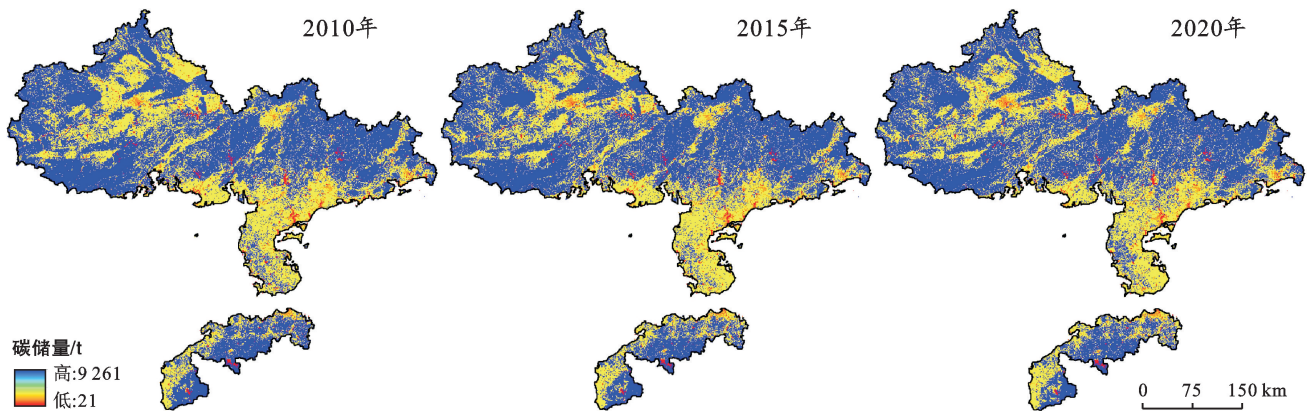


图3 2010—2020年北部湾城市群碳储量分布变化情况

从土地利用类型与碳密度二者关系的角度看,北部湾城市群各城市的碳储量变化与土地利用类型变化具有强相关性(参考表6与表10)。林地的碳汇最强,2020年林地碳储量占总储量的80.59%,其余地类碳储量占比依次为耕地18.83%,建设用地0.53%,

草地0.04%,水域0.01%,未利用地几乎忽略不计。由此可见,生态空间中的林地占据了过半的碳储量,生态空间各地类碳储量总和占比达到80.64%,与生态空间土地面积占比60.15%相接近,证明了两者的相关性。



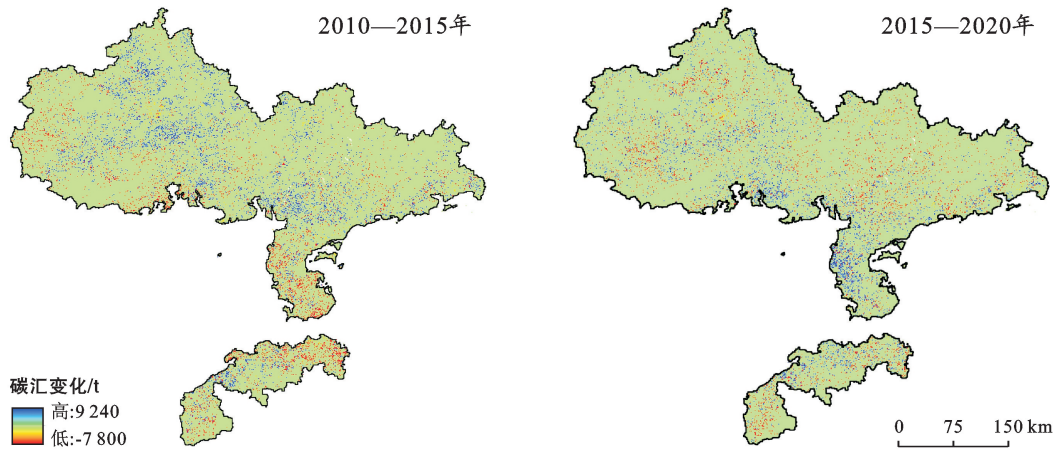


图 4 2010—2020 年北部湾城市群碳汇空间分布情况

表 9 2010—2020 年北部湾城市群各城市碳平均密度

kg/m<sup>2</sup>

年份	各城市碳平均密度														
	南宁	防城港	钦州	北海	崇左	玉林	茂名	湛江	阳江	海口	儋州	东方	澄迈	临高	昌江
2010	6.26	7.92	7.18	4.58	7.31	7.54	7.15	4.32	7.05	6.50	6.77	6.32	7.73	6.67	7.15
2015	6.54	7.65	7.23	4.68	7.28	7.63	7.17	4.15	7.12	5.68	6.82	6.03	7.27	6.44	7.03
2020	6.51	7.63	7.30	4.96	7.22	7.49	7.06	4.39	7.09	5.52	6.81	5.69	7.17	6.73	6.86

表 10 2010—2020 年北部湾城市群土地利用类型 km<sup>2</sup>

年份	各土地利用类型面积					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2010	4.36×10 <sup>4</sup>	6.75×10 <sup>4</sup>	112	2 850	2 055	3
2015	4.31×10 <sup>4</sup>	6.77×10 <sup>4</sup>	115	2 694	2 468	2
2020	4.35×10 <sup>4</sup>	6.74×10 <sup>4</sup>	89	2 392	2817	3

观察城市群内各城市的碳密度与地类变化情况,钦州、北海碳密度有所上升,防城港、海口、澄迈、临高、湛江遏止住下降趋势,其他城市 2015—2020 年的碳密度都比 2010—2015 年下滑更多,其中海口、东方、昌江下滑较严重。各城市的地类中,面积变化较大的一般为耕地和林地。由表 11 可知,2010—2015 年各城市的建设用地大幅扩张,侵占耕地与林地,上述情

况在各城市的碳密度中有所反映。2015—2020 年除茂名的建设用地缩小外,其他城市的建设用地依然在扩张,受影响较大的地类为水域、耕地与林地。由此可见,北部湾城市群多数城市仍处于快速扩张阶段,对城市群的碳汇造成负面影响,使区域生态环境趋于恶化,破坏生态空间。

3.2.2 未来碳汇变化模拟分析 在 2035 年多情景预测中,不同情景下的碳储量也会随土地利用格局的变化而变化。由表 12 可知,2035 年城镇优先与农业优先情景下的碳储量低于生态优先情景,且 2020—2035 年城镇优先情景的碳储量下降最多。另外,2035 年北部湾城市群 3 种情景下的碳密度与 2020 年相比,城镇优先和农业优先场景出现了下滑,生态场景与 2020 年相比有所增加。

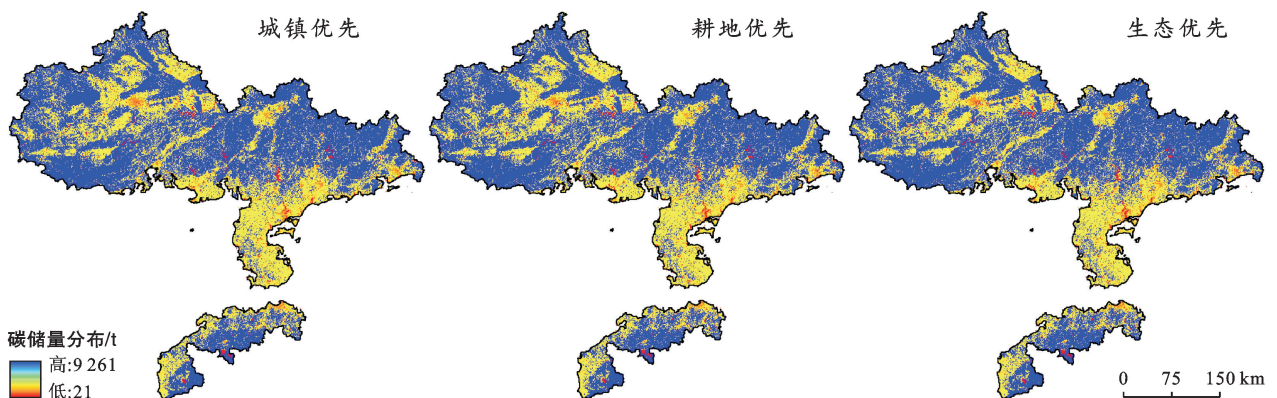


图 5 2035 年北部湾城市群 3 种情景下的碳储量分布



表 11 2010—2020 年北部湾城市群各城市碳平均密度与土地利用类型变化

项目	2010—2015 年							2015—2020 年						
	碳平均密度/ (kg·m <sup>-2</sup> )	耕地/ km <sup>2</sup>	林地/ km <sup>2</sup>	草地/ km <sup>2</sup>	水域/ km <sup>2</sup>	建设 用地/km <sup>2</sup>	未利 用地/km <sup>2</sup>	碳平均密度/ (kg·m <sup>-2</sup> )	耕地/ km <sup>2</sup>	林地/ km <sup>2</sup>	草地/ km <sup>2</sup>	水域/ km <sup>2</sup>	建设 用地/km <sup>2</sup>	未利 用地/km <sup>2</sup>
南宁市	0.28	-1 145	1 066	-2	-9	90	0	-0.03	17	-80	-7	-37	107	0
防城港市	-0.27	259	-270	6	-14	19	0	-0.02	41	-33	2	-23	13	0
钦州市	0.05	-110	93	3	-11	25	0	0.07	-120	117	6	-21	18	0
北海市	0.10	-64	56	-2	-16	26	0	0.28	-101	134	-2	-41	9	1
崇左市	-0.03	73	-97	6	5	13	0	-0.06	168	-163	-14	-5	14	0
玉林市	0.09	-261	220	0	1	40	0	-0.14	292	-315	2	-17	38	0
茂名市	0.02	-50	44	-1	-9	17	-1	-0.11	198	-224	-1	-20	-47	0
湛江市	-0.17	331	-347	1	-63	77	1	0.24	-428	465	1	-82	44	0
阳江市	0.07	-101	94	-1	-20	28	0	-0.03	33	-40	-6	-10	23	0
海口市	-0.82	260	-292	-1	-1	34	0	-0.16	63	-63	-2	-10	12	0
儋州市	0.05	-34	26	1	-12	9	0	-0.01	7	-4	2	-10	5	0
东方市	-0.29	108	-106	-5	-5	8	0	-0.34	131	-129	-4	-6	8	0
澄迈市	-0.46	133	-149	-1	1	16	0	-0.1	30	-30	-1	1	3	0
临高市	-0.23	49	-51	0	0	2	0	0.29	-62	63	0	-4	3	0
昌江市	-0.12	28	-30	0	3	-1	0	-0.17	49	-46	0	4	1	0

表 12 2035 年北部湾城市群 3 种情景下碳储量、碳平均密度与变化情况

情景模式	2035 年碳储量/t	2020—2035 年 碳汇情况/t	碳平均密度/ (kg·m <sup>-2</sup> )	2020—2035 年碳平均密度 变化/(kg·m <sup>-2</sup> )
城镇优先	7.71×10 <sup>8</sup>	-3.12×10 <sup>6</sup>	6.64	-0.03
农业优先	7.72×10 <sup>8</sup>	-2.16×10 <sup>6</sup>	6.65	-0.02
生态优先	7.76×10 <sup>8</sup>	1.91×10 <sup>6</sup>	6.68	0.02

在空间分布上,结合图 5 与表 13 可知,北部湾城市群 2035 年各模拟情景下的碳储量分布总体相似,高碳汇区域分布在粤西与桂东南区域。在城镇优先情景下,碳平均密度下降较严重的城市为北海,其他城市中,防城港、钦州、湛江、阳江、儋州、临高出现下滑,原因在于城镇空间扩张过快导致碳汇下降。在农

业优先情景下,防城港、钦州、北海、澄迈、湛江、阳江、儋州、临高有所下降,其他城市除南宁外,碳密度都有所上升,原因在于农业空间碳汇一直保持在较高水平。在生态优先情景下,钦州、北海、湛江、临高碳密度略有下降,其他城市的碳密度有所上升,生态空间面积的保持稳定了区域碳汇。

表 13 2035 年北部湾城市群 3 种情景下各城市碳平均密度与变化情况

情景	项目	南宁市	防城港市	钦州市	北海市	崇左市	玉林市	茂名市	湛江市	阳江市	海口市	儋州市	东方市	澄迈市	临高市	昌江市
城镇 优先	碳平均密度	6.51	7.62	7.20	4.67	7.25	7.60	7.13	4.11	7.05	5.54	6.78	6.02	7.17	6.23	7.00
	增减量	0	-0.01	-0.10	-0.29	0.03	0.11	0.07	-0.28	-0.04	0.02	-0.03	0.33	0	-0.50	0.14
农业 优先	碳平均密度	6.51	7.61	7.19	4.67	7.24	7.61	7.15	4.15	7.04	5.61	6.80	6.01	7.22	6.36	7.02
	增减量	0	-0.02	-0.11	-0.29	0.02	0.12	0.09	-0.24	-0.05	0.09	-0.01	0.32	0.05	-0.37	0.16
生态 优先	碳平均密度	6.54	7.66	7.23	4.68	7.29	7.63	7.17	4.15	7.13	5.69	6.82	6.03	7.28	6.44	7.03
	增减量	0.03	0.03	-0.07	-0.28	0.07	0.14	0.11	-0.24	0.04	0.17	0.01	0.34	0.11	-0.29	0.17

### 3.3 碳汇格局演变驱动因子分析

由于土地利用格局的演变决定了城市群的碳汇空间格局变化,城镇化进程的推进会使得区域碳汇下降,因而使用地理加权回归进行土地利用格局变化驱动因子分析能够找到碳汇格局改变的驱动机制及各驱动因子对碳汇格局变化的影响程度,详细的地理加权回归分析拟合优度  $R^2$  值如表 14 所示。在土地利

用格局演变的过程中对地类变化影响最大的驱动因子为高程因子,与林地的拟合优度最高。其次,在分项地理加权回归分析中,对耕地变化影响较大的是人口密度与高程因子,对林地变化影响较大的为高程和坡度因子,对草地变化影响较大的为道路距离因子,对水域变化影响较大的是水系距离因子,对建设用地变化影响较大的是人口密度因子,对未利用地影响较

大的是道路距离因子。其中,林地的主要驱动因素拟合优度超过了 50%,表明驱动因子贡献率较高。由

此得出,生态空间碳汇格局变化的主要驱动因素为高程、坡度和人口密度。

表 14 北部湾城市群土地利用格局地理加权回归分析拟合优度

土地利用类型	地理加权回归分析拟合优度								
	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$	$d_9$
耕地	0.41	0.36	0.41	0.33	0.34	0.33	0.33	0.34	0.37
林地	0.61	0.53	0.56	0.53	0.58	0.53	0.52	0.54	0.57
草地	0.14	0.10	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10	0.13	0.15
水域	0.08	0.06	0.07	0.09	0.06	0.07	0.06	0.10	0.09
建设用地	0.09	0.11	0.15	0.09	0.08	0.08	0.08	0.10	0.11
未利用地	0.14	0.10	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10	0.13	0.15

注: $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9$  依次代表高程、夜间灯光、人口密度、坡向、坡度、距高速公路距离、距铁路距离、距水系距离、距普通道路距离的驱动因子。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

#### 4.1.1 研究评价

(1) 根据模型的参数设置与精度验证,研究采用的模拟技术总体是可靠的,能够反映在自然保护区等政策区域条件限制下,城镇空间、农业空间和生态空间各自的发展状态,且 FLUS-InVEST 模型正逐渐推广<sup>[34]</sup>说明了技术的可靠性。在因子和相关性分析方法的选择上也考虑了大部分潜在影响因素,收集了自然、社会、空间等方面的研究数据,能较全面地反映各类因素对城市群碳汇演变的作用,对沿海城市群发展导向与政策制定有一定参考性。目前城市群碳汇模拟与驱动因素相关研究仍处于稀缺状态,内容主要针对往年碳浓度与土地相关性、碳浓度时空演变分析等相对主流的内容,因此该研究有一定的参考意义。

(2) 受条件所限,研究无法实地测量碳密度,故采纳广东省广州市测定值。由于影响碳密度的主要因素为降雨量和温度<sup>[35]</sup>,广东省与北部湾城市群属同一气候区,两者降雨量与温度几乎一致,因此碳密度值也较接近,类似的碳密度值引用在过往文献中<sup>[31]</sup>有所体现,其广东碳密度值考虑了广西实测数据。

(3) 研究的误差来自多方面,如 FLUS 模型本身的精度问题,部分参数采取经验值处理;以及因 InVEST 算法简化对计算精度造成的影响问题,碳储量模块考虑静态而忽略碳循环和不同碳库间的动态转化问题,碳循环算法简化会导致目标时段的碳汇被假设为线性变化,不够贴近实际情况。今后的研究可以进一步提高精确度,采用参数更完善的模拟技术控制变量。

4.1.2 建议 根据政府工作报告提出的碳中和目标与北部湾城市群自身的城镇化发展要求,采取生态优

先的发展方式能够较好地兼顾城镇发展与生态空间的资源环境保护需求。对道路、人口密度等易控制的人为因素,在建设时需谨慎考虑其对环境的影响,避免对林地等重要碳库造成大规模破坏。根据 2035 年的模拟显示,只有在生态优先情景导向下,生态空间才能够得到良好的保护,因此需尽早制定政策,加强保护措施以抑制建设用地的快速扩张,落实政府的碳达峰与碳中和目标。

### 4.2 结论

城镇优先是碳密度下降最快的情景,2035 年该情景的碳汇量比 2020 年减少  $3.12 \times 10^6$  t,碳平均密度比 2020 年下降  $0.03 \text{ kg/m}^2$ ,延续 2010—2020 年的碳密度下降趋势,若不限制城镇用地扩张,城市群生态环境与碳汇功能将遭到极大破坏。农业优先情景的碳汇量比 2020 年减少了  $2.16 \times 10^6$  t,碳平均密度下降比城镇优先情景减缓。生态优先情景下的碳汇量比 2020 年增加  $1.91 \times 10^6$  t,碳平均密度也有所增加。

研究使用地理加权回归分析了北部湾城市群碳汇格局演变的驱动因素,了解碳汇、土地和驱动因子间的关系及驱动机制,在所有因子中,人口密度、坡度、道路距离、高程、水系距离是影响程度最高的解释变量,也是该地区土地利用与碳汇格局变化最重要的驱动力,其中生态空间碳汇格局的主要驱动因素是高程、坡度和人口密度,城镇空间扩张挤压生态空间是造成生态空间碳汇变化的主要原因。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李建明,罗能生.1998—2015 年长江中游城市群雾霾污染时空演变及协同治理分析[J].经济地理,2020,40(1):76-84.
- [2] 褚琳,张欣然,王天巍,等.基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J].应用生态学报,2018,29(12):4106-4118.

- [3] 王钧,宫清华,宇岩,等.粤港澳大湾区城市群自然灾害综合承灾能力评价[J].地理研究,2020,39(9):2189-2199.
- [4] 李慧颖,李晓燕,贾明明,等.基于 CA-Markov 模型的长吉示范区土地利用格局多情景预测研究[J].地理信息世界,2019,26(3):18-24.
- [5] 黎云云,畅建霞,王义民,等.基于 CA-Markov 模型的黄河流域土地利用模拟预测研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(12):107-116.
- [6] 戴尔阜,马良.土地变化模型方法综述[J].地理科学进展,2018,37(1):152-162.
- [7] Bai Yang, Wong C P, Jiang Bo, et al. Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning [J]. Nature Communications, 2018,9:3034.
- [8] 刘菁华,李伟峰,周伟奇,等.权衡城市扩张、耕地保护与生态效益的京津冀城市群土地利用优化配置情景分析[J].生态学报,2018,38(12):4341-4350.
- [9] 王丽妍.生态空间质量约束下的城镇用地增长情景模拟:以改进的 SLEUTH 模型为例[D].江苏南京:南京大学,2016.
- [10] 刘嘉勋.城市扩展模拟与生态空间质量约束的城市开发边界划定研究[D].江苏南京:南京大学,2018.
- [11] Lin Gang, Jiang Dong, Fu Jingying, et al. Spatial conflict of production-living-ecological space and sustainable-development scenario simulation in Yangtze River Delta agglomerations [J]. Sustainability, 2020,12(6):2175.
- [12] 陈永林,谢炳庚,钟典,等.基于微粒群—马尔科夫复合模型的生态空间预测模拟:以长株潭城市群为例[J].生态学报,2018,38(1):55-64.
- [13] Yang Jun, Guo Andong, Li Yonghua, et al. Simulation of landscape spatial layout evolution in rural-urban fringe areas: A case study of Ganjingzi District [J]. GIScience & Remote Sensing, 2019,56(3):388-405.
- [14] 苏姗.基于景观格局与 MCE-CA-Markov 的土地利用变化模拟预测:以都江堰市为例[D].四川成都:四川师范大学,2019.
- [15] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. Landscape and Urban Planning, 2017,168:94-116.
- [16] 朱寿红,舒帮荣,马晓冬,等.基于“反规划”理念及 FLUS 模型的城镇用地增长边界划定研究:以徐州市贾汪区为例[J].地理与地理信息科学,2017,33(5):80-86.
- [17] 张子明,刘平辉,朱寿红.基于 FLUS 模型的城镇用地增长边界划定研究:以临川区为例[J].江西农业学报,2018,30(5):117-123.
- [18] 林沛锋,郑荣宝,洪晓,等.基于 FLUS 模型的土地利用空间布局多情景模拟研究:以广州市花都区为例[J].国土与自然资源研究,2019(2):7-13.
- [19] 韩其飞,罗格平,李超凡,等.基于 Biome-BGC 模型的天山北坡森林生态系统碳动态模拟[J].干旱区研究,2014,31(3):375-382.
- [20] 吴晓全,王让会,李成,等.天山植被 NPP 时空特征及其对气候要素的响应[J].生态环境学报,2016,25(11):1848-1855.
- [21] 朱珊,袁倩文,黎航,等.改进 TVP 模型下探究建设用地对南宁 CO<sub>2</sub> 分布影响[J].地理空间信息,2019,17(2):87-92.
- [22] 张鑫彤,吴秀芹.基于 CASA 模型的 2005—2019 年云南断陷盆地 NPP 时空变化研究[J].地球学报,2021,42(3):426-434.
- [23] 唐尧,祝炜平,张慧,等.InVEST 模型原理及其应用研究进展[J].生态科学,2015,34(3):204-208.
- [24] 王秀明,刘谓承,龙颖贤,等.基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J].水土保持研究,2020,27(5):381-388.
- [25] 潘艺,鲍海君,黄玲燕,等.浙江沿海城市化时空格局演变及其对生境质量的影响:基于 InVEST 模型的研究[J].上海国土资源,2020,41(3):18-24.
- [26] 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.
- [27] Jie Yang, Xin Huang. The 30 m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1990 to 2020 (1.0.0) [Z]. Zenodo (2021)[2021-09-22]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5210928>.
- [28] 孟成,卢新海,彭明军,等.基于 Markov-C 5.0 的 CA 城市用地布局模拟预测方法[J].中国土地科学,2015,29(6):82-88.
- [29] 张阳,靳雪,龚先洁.陕西省乡村旅游示范村空间分异特征与可达性研究[J].西北师范大学学报(自然科学版),2021,57(5):26-32.
- [30] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1018-1029.
- [31] 吴隽宇,张一蕾,江伟康.粤港澳大湾区生态系统碳储量时空演变[J].风景园林,2020,27(10):57-63.
- [32] 方精云,黄耀,朱江玲,等.森林生态系统碳收支及其影响机制[J].中国基础科学,2015,17(3):20-25.
- [33] 朱志强,马晓双,胡洪.基于耦合 FLUS-InVEST 模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J].水土保持通报,2021,41(2):222-229.
- [34] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等.基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J].热带地理,2019,39(3):397-409.
- [35] 陈光水,杨玉盛,刘乐中,等.森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J].亚热带资源与环境学报,2007,2(1):34-42.