基于FLUS模型的区域交通与土地利用一体化 碳排放研究

——以苍南县为例

金 靓, 刘魏巍, 张 金

上海理工大学管理学院,上海

收稿日期: 2024年9月14日; 录用日期: 2024年10月18日; 发布日期: 2024年10月29日

摘要

本文以苍南县为例,研究国土空间规划视角下交通与土地利用一体化的碳排放情况。通过分析区域交通 与土地利用的互馈机理,结合土地利用模拟预测模型与交通四阶段模型,构建了一体化系统,模拟不同 发展情景下的碳排放。结果表明:1)无一体化反馈的Kappa精度为0.795,总体精度达0.893,而在一体 化反馈下的Kappa精度达0.893,总体精度为0.915,表明一体化反馈能提高模型精度,实现更精确的土 地利用模拟。2)在不同发展情景下,县城主建成区的碳排放最高,需重点关注。3)结合国土空间土地 利用空间布局分析,生态保护优先情景下交通碳排放较其他情景显著增加的主要原因是建设用地过于集 中,碳源类用地规划失衡。模拟结果为区域规划提供参考,建议苍南县增加碳汇用地,优化交通结构, 推广新能源汽车,以促进碳减排和可持续发展。

关键词

国土空间规划,区域交通与土地利用一体化,人工神经网络,元胞自动机模拟,碳排放

Research on Integrated Carbon Emissions of Regional Transportation and Land Use Based on FLUS Model

-A Case Study of Cangnan County

Liang Jin, Weiwei Liu, Jin Zhang

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Sep. 14th, 2024; accepted: Oct. 18th, 2024; published: Oct. 29th, 2024

Abstract

This paper takes Cangnan County as an example to study the carbon emissions from the integration of transport and land use under the perspective of territorial spatial planning. By analyzing the mutual feedback mechanism of regional transport and land use, and combining the land use simulation prediction model with the four-phase transportation model, an integrated system is constructed to simulate the carbon emissions under different development scenarios. The results show that: 1) the Kappa accuracy without integrated feedback is 0.795, and the overall accuracy reaches 0.893, while the Kappa accuracy with integrated feedback reaches 0.893, and the overall accuracy reaches 0.915, which indicates that the integrated feedback improves the model accuracy and achieves a more accurate land use simulation. 2) Under different development scenarios, the main built-up area of the county city has the highest carbon emissions, which needs to be focused on. 3) Combined with the analysis of the spatial layout of land use in the national territory space, the main reason for the significant increase in carbon emissions from transport under the ecological protection priority scenario compared with other scenarios is the over-concentration of construction land and the imbalance in the planning of land use in the carbon source category. The simulation results provide a reference for regional planning, and it is recommended that Cangnan County increase the land for carbon sinks, optimize the transport structure, and promote new energy vehicles to promote carbon emission reduction and sustainable development.

Keywords

National Spatial Planning, Regional Transportation and Land Use Integration, Artificial Neural Networks, Cellular Automata Simulation, Carbon Emission

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

近年来,我国经济增长与生态环境保护之间的矛盾日益凸显,全球碳排放量因能源消耗的不断增加 而持续攀升,构建"低碳城市"已成为各国发展的重要目标。中国也提出于 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和的战略目标[1],到 2030 年,交通运输业碳排放量将是 2000 年的四倍,其中道路交通约 占碳排放量的一半,成为实现减排目标的关键行业[2][3]。可见,国土空间视角下区域交通与土地利用的 一体化碳排放研究对优化土地结构、提高碳减排效果尤为关键。

当前,国内外学者针对交通碳排放与土地利用碳排放问题的研究内容主要包括以下三个方面:① 土 地利用与交通的关系研究[4]。毛蒋兴[5]等人宏观研究了土地利用与交通的相互关系,发现高密度开发的 城市交通系统对土地利用的影响显著。赵童[6]和 Wu B 等人[7]则研究了微观层面的交通与土地利用关系, 采用空间微观模拟模型分析区域内具体场所的功能与交通流动。这些研究成果为苍南县交通与土地利用 一体化碳排放的研究提供了理论基础。② 未来土地利用模拟预测研究。模拟预测模型包括数量模型[8]和 空间模型[9],现阶段常用的模型为 CA-Markov 模型[10]、FLUS 模型[11]和 PLUS 模型[12]。这些研究为 本文土地利用模型的选取提供了理论支持。③ 土地利用和交通碳排放影响因素研究。在土地利用碳排放 方面,Feng 等人[13]指出,生活方式和技术在不同区域的 CO₂排放中起关键作用。杨翱等人[14]探讨了碳 减排目标与政策效应,显示政策设计对土地利用碳排放的调节作用。而杨皓然和吴群[15]的研究表明,不 同政策方案对南京市的碳排放动态具有显著影响。综合来看,影响土地利用碳排放的因素包括地形、气候条件、经济、政策、生活方式等[13]-[15]。在交通碳排放方面,杨文越等人[16]-[18]通过模型分析城市 土地利用对交通碳排放的影响;而 Chow A 等人[19] [20]通过模拟预测对比不同情景下的交通碳排放,以 确定最有利于低碳城市建设的方案。

综上,对交通与土地利用碳排放的一体化的现有研究已有比较丰硕的成果,但多局限于城市内部, 缺乏区域范围内的考虑。因此,本研究以苍南县为研究对象,明确了国土空间规划视角下区域交通与土 地利用一体化碳排放关系,阐明了内在的驱动机制,并尝试回答了以下问题:1)国土空间规划视角下区 域土地利用演化机理?2)国土空间规划视角下区域交通与土地利用互馈机理?3)区域交通碳排放与土 地利用碳排放计算?4)不同情景下区域交通碳排放与土地利用碳排放计算?以期为区域碳减排、交通结 构调整以及土地管理决策提供科学依据。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 数据来源

本文使用的数据主要包括苍南县土地利用数据、社会经济数据、遥感地理信息数据、数字高程数据 等,数据来源及预处理方法如表1所示。

Table 1. Data types and sources 表 1. 数据类型及来源

数据类型	数据来源		
行政区划矢量数据	全国地理信息资源目录服务系统		
土地利用数据	中国科学院资源环境科学数据中心		
DEM 数据、坡度数据	地理空间数据云		
社会经济数据、人口密度数据、能源数据	《温州市统计年鉴》《苍南县统计年鉴》		
地理矢量数据(包含道路网数据、居民点分布数据、 铁路站点位置数据)	全国地理信息资源目录服务系统		

本文使用苍南县 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年及 2020 年五期土地利用现状数据,用于分析土 地利用数量变化及土地利用空间布局模拟。按研究所需将土地分为耕地、林地、草地、水域、建设用地 和其他六大类。

2.2. 研究方法

GeoSOS-FLUS 是根据 FLUS 模型的原理开发的多类上地利用变化情景模拟软件,用于模拟人类活动与自然影响下的土地利用变化以及未来土地利用情景的模型。FLUS 模型采用神经网络算法(ANN)从一期土地利用数据与包含人为活动与自然效应的多种驱动力因子中获取各类用地类型在研究范围内的适宜性概率;接着利用基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,处理多种土地利用类型在自然作用与人类活动共同影响下发生相互转化时的不确定性与复杂性,使得 FLUS 模型具有较高的模拟精度并且能获得与现实土地利用分布相似的结果。

2.2.1. 基于人工神经网络的用地分布适宜性概率计算

神经网络算法分为输入层、隐藏层和输出层。输入层为影响土地利用变化的驱动因素,输出层为各

土地利用类型。公式为:

$$sp(p,k,t) = \sum_{j} w_{j,k} \times sigmoid\left(net_{j}(p,t)\right) = \sum_{j} w_{j,k} \times \frac{1}{1 + e^{-net_{j}(p,t)}}$$
(1)

式中, sp(p,k,t)为土地利用类型 k 在训练时间 t 在栅格单元 p 上的出现概率; $w_{j,k}$ 是隐藏层和输出层间的自适应权重,随着训练过程会动态变化; sigmoid $(net_j(p,t))$ 是隐藏层对输出层的激活函数; $e^{-net_j(p,t)}$ 是在训练时间上第 t 个隐藏层在栅格单元所接受的信号。

2.2.2. 基于自适应惯性机制的元胞自动机计算

通过对人工神经网络对土地利用分布概率的计算,能够清晰地反映各类用地适用性概率的相关性, 在此基础上,结合邻域效应、自适应惯性系数、转换成本和限制因素,计算土地利用变化的总体概率, 最后通过轮盘赌选择机制确定每个栅格的最终土地利用类型。

1) 邻域效应。领域效应反映用地类型在土地利用变化过程中的扩张能力,公式如下:

$$\Omega_{p,k}^{t} = \frac{\sum N \times Ncon\left(c_{p}^{t-1} = k\right)}{N \times N - 1} \times W_{k}$$
⁽²⁾

式中, $\Omega'_{p,k}$ 为第 t 次送代时栅格单元 p 上地类 k 的邻域影响; $con(c_p^{t-1} = k)$ 为 t-1次选代后 $N \times N$ 窗口内 土地利用类型 k 所占用的栅格总数; W_k 为土地利用类型 k 的邻域扩张权重。

2) 自适应惯性系数。FLUS 模型中自适应惯性竞争机制的核心是自适应惯性,即每类土地的惯性系数由现有土地数量与土地需求之间的差异决定,在迭代过程中进行自适应调整,从而使各类用地的数量向预定目标发展,第 k 种用地类型在 t 时间上的自适应惯性系数 Inertial^k 的公式如下:

$$Inertial_{k}^{t} = \begin{cases} Inertiall_{k}^{t-1} & \left|D_{k}^{t-1}\right| \leq \left|D_{k}^{t-2}\right| \\ Inertiall_{k}^{t-1} \times \frac{D_{k}^{t-2}}{D_{k}^{t-1}} & 0 > D_{k}^{t-2} > D_{k}^{t-1} \\ Inertiall_{k}^{t-1} \times \frac{D_{k}^{t-1}}{D_{k}^{t-2}} & D_{k}^{t-1} > D_{k}^{t-2} > 0 \end{cases}$$
(3)

式中, D_t^{t-1}表示在第t-1次迭代时宏观需求与土地利用类型k的供给量的栅格数量差距。

3) 转换成本。转换成本反映了土地利用类型相互转换的难易程度,为二值矩阵,0表示某一地类不可转化为某一其他地类,1表示某一地类可以转换为某一其他地类。

4) 轮盘赌选择机制。每一土地利用类型的总体概率都是由适宜性概率、邻域效应、自适应惯性系数 和转换成本共同决定。栅格单元 P 在选代次数 t 时由原土地利用类型转化为土地利用类型 k 组合概率 TP^t_{nk}公式如下:

$$TP_{p,k}^{t} = P_{p,k} \times \Omega_{p,k}^{t} \times Inertiala_{k}^{t} \times \left(1 - sc_{c \to k}\right)$$

$$\tag{4}$$

式中, $P_{p,k}$ 为适宜性概率; $\Omega'_{p,k}$ 为邻域效应; *Inertiala'*_k 为自适应惯性系数; $sc_{c\to k}$ 为原土地利用类型 c 转 化为土地利用类型 k 所需的转换成本。

2.2.3. 碳排放测算方法

土地利用碳排放测算方法

土地利用碳排放采取直接碳排放测算法。公式为:

$$E1 = \sum e_i = \sum S_i \times \delta_i \tag{5}$$

式中, E1 代表直接碳排放总量; e; 代表不同土地利用类型产生的碳排放(吸收)量; S; 代表不同土地利用

类型面积; δ,代表不同土地利用类型碳排放(吸收)系数。

本文参考已有研究[21],结合苍南县实际条件,对各土地利用类型的碳排放系数选取进行讨论,结果如表 2 所示:

土地利用类型	碳排放系数(t/km²)
耕地	42.2
林地	-64.4
草地	-2.10
水域	-21.8
未利用地	-0.5

 Table 2. Direct carbon emission factors for land use

 表 2. 土地利用直接碳排放系数

建设用地碳排放采用间接碳排放测算方法,公式为:

$$E2 = \sum e_j = \sum m_j \times c_j \times \sigma_j \tag{6}$$

式中, E2 为建设用地碳排放, e_j 为研究区域各种能源的碳排放, j 为能源类型, m_j 为不同能源终端消费量; c_j 为各种能源折算成标准煤的系数; σ_j 为各能源的碳排放系数。 c_j 和 σ_j 和取值如表 3。

Table 3. Standard coal conversion factors and carbon emission factors for different energy sources

能源类型	标准煤换算系数	碳排放系数(t 碳/t)	
原煤	0.7143 (t 标准煤/t)	0.7559	
焦炭	0.9714 (t 标准煤/t)	0.8550	
汽油	1.4714 (t 标准煤/t)	0.5538	
原油	1.4286 (t 标准煤/t)	0.5857	
煤油	1.4714 (t 标准煤/t)	0.5714	
柴油	1.4571 (t 标准煤/t)	0.5921	
燃料油	1.4286 (t 标准煤/t)	0.6185	
液化石油气	1.7143 (t 标准煤/t)	0.5042	
热力	3.4122 (t 标准煤/万千焦)	0.2601	
电力	0.1229 (kg/kwh)	0.2132	

表 3. 不同能源标准煤折算系数和碳排放系数

本文通过模拟优化未来土地利用来预测土地碳排放,鉴于未来城市能源消耗数据的未知性,以单位 GDP 能耗数据为基础,折算苍南县建设用地碳排放总量。其计算公式为:

$$E3 = E_w \times \frac{GDP_c \times P_c}{GDP_w \times P_w} \tag{7}$$

式中, *E*3 为苍南县建设用地碳排放, *E_w* 为温州市建设用地碳排放,根据式(6)测算而来。*GDP_c* 和 *GDP_w* 分别是苍南县和温州市地区生产总值; *P_c* 和 *P_w* 分别为苍南县和温州市单位 GDP 能耗。土地利用碳排放 总量为各用地类型碳排放量与碳吸收量的总和:

$$E = E1 + E3 \tag{8}$$

式中, E为土地利用碳排放总量。E1代表直接碳排放量; E3代表间接碳排放量。

2.3. 交通碳排放测算

目前,对于道路交通碳排放的测算方法主要是采用 IPCC 移动排放源测算法,又称排放系数法[22], 分为"自上而下"和"自下而上"两种形式。其中"自上而下"法基于能源消耗和能量转换因子来计算 交通碳排放量,公式为:

$$E = \sum_{i} \left[S_i \times EF_i \right] \tag{9}$$

式中: *E* 表示交通碳排放总量,单位为 kg; *i* 为燃料类型,包含汽油、柴油、煤油、天然气等; *S*_i 表示 *i* 燃料的消耗量,单位为 TJ; *EF*_i 表示 *i* 燃料的排放系数,单位为 kg/TJ。

"自下而上"法是利用不同的交通出行方式、车辆类型、行驶距离等数据来计算交通碳排放。公式为:

$$E = \sum_{i,j} \left[D_{i,j} \times S_{i,j} \times P_i \times G_i \times EF_{i,j} \right]$$
(10)

式中: *j* 表示交通工具类型; *D*_{*i*,*j*} 为使用 *i* 燃料的 *j* 类交通方式的行驶总里程,单位为 km; *S*_{*i*,*j*} 为使用 *i* 燃料的 *j* 类交通方式的单位里程消耗量,单位为 L/km; *P*_{*i*} 表示 *i* 燃料的燃油密度,单位为 kg/L; *G*_{*i*} 为 *i* 燃料的净热值,单位为 TJ/kg; *EF*_{*i*,*i*} 表示 *i* 燃料的排放系数,单位为 kg/TJ。

3. 结果分析

3.1. 驱动因子选取

结合驱动因子的选取原则,参考前人的研究成果[23],本文选定八种驱动因子,以进行土地利用的模 拟预测,如表4所示。

Table	• 4. Selection	of drivers	of lan	d use c	hange
表 4.	土地利用变	化驱动因	子选耶	ι	

类型	驱动因子	含义		
社会伝対	人口密度	各栅格单元中心点的人口密度		
社云红桥	GDP	各栅格单元中心点的 GDP		
白树山田	高程	各栅格单元中心点的高程值		
日然地珪	坡度	各栅格单元中心点的坡度		
	道路网密度	各栅格单元的渔网密度		
司计外	距城镇中心距离	各栅格到城镇中心的欧氏距离		
可达性	距公路距离	各栅格到公路的欧氏距离		
	距铁路站距离	各栅格到铁路站的欧氏距离		

3.2. 土地利用时空演变特征分析

3.2.1. 土地利用数量特征分析

基于苍南县 2000~2020 年的遥感图像,分析 2000~2020 年苍南县土地利用时空演变特征如表 5 所示。

Table 5. Combined area and percentage of land use in Cangnan County for the five phases 2000~2020 (square kilometres) 表 5. 苍南县 2000~2020 五期土地利用合并面积及占比(平方公里)

年份	20	000	20	005	20	010	20)15	20)20
地类	面积	占比								
耕地	285.46	27.88%	267.56	26.12%	266.12	25.99%	261.61	25.56%	259.28	25.29%
林地	670.57	65.50%	674.46	65.85%	665.73	65.02%	666.2	65.08%	655.8	63.96%
草地	40.71	3.98%	38.77	3.79%	39.77	3.88%	39.58	3.87%	40.21	3.92%
水域	6.34	0.62%	6.21	0.61%	6.34	0.62%	6.03	0.59%	6.34	0.62%
建设用地	20.25	1.98%	36.78	3.59%	45.51	4.44%	49.78	4.86%	63.16	6.16%

从表 5 可以看出,2000 年至 2020 年间,苍南县土地利用变化显著。耕地整体呈下降趋势,由2000 年的 27.88% 降至 2020 年的 25.29%。林地、草地和水域面积基本稳定,建设用地变化明显,由2000 年的 1.98% 升至 2020 年的 6.16%。城镇用地在 2000 年至 2005 年间从 7.74 平方公里增至 20.47 平方公里,2015 年至 2020 年间其他建设用地从 12.13 平方公里增至 25.84 平方公里,主要包括交通设施、能源和特殊用地。通过分析可知,苍南县的建设用地快速扩张,占用了大量的林地和耕地面积,在 2000~2005 年最为明显。

3.2.2. 土地利用转移矩阵分析

土地利用转移矩阵是一种二维矩阵,用于描述同一地区在不同时相之间的土地利用变化关系。通过 ArcGIS 软件得出苍南县 2000~2020 各时间段土地利用类型间的转化关系及转化特征如图 1 所示。



Figure 1. Transformation relationship of each land use type in Cangnan County 图 1. 苍南县各用地类型转化关系图

由图 1 可知,2000 年至 2005 年,建设用地扩张较多,其中极大部分来自耕地。2000 年前后,中国城市化和工业化快速推进,经济迅速增长,城市基础设施扩张主要集中在中心城区周边。2005 年至 2010 年,建设用地扩张减缓,主要分布在城区边缘。由于耕地保护政策实施,减缓了耕地流失。2010 年至 2015 年,建设用地持续减少,反映了生态保护和环保政策的成效。2015 年至 2020 年,耕地、林地、建设用地均有土地流入,湿地保护、退耕还林还草工程继续推进,城市化和工业化推动了土地的进一步开发。

3.3. 交通与土地利用一体化分析

3.3.1. 交通与土地利用一体化互馈机制

国土空间规划视角下区域交通与土地利用一体化的核心是互馈机制的实现。本文一体化系统的互馈 机制如图 2 所示。



Figure 2. Schematic diagram of the realisation of the integrated mutual feed mechanism 图 2. 一体化互馈机制实现示意图

3.3.2. 交通可达性反馈分析

国土空间土地利用和交通结构二者之间的相互作用并不是简单的对应关系,土地利用作用于交通, 交通反作用于土地利用,二者是一个相互反馈、协调发展的动态系统。构建一体化前后的邻域权重、转 移概率矩阵,结合调整后的土地利用类型转移概率矩阵,运用 Markov 模型预测 2020 年土地利用数量, 并使用 Kappa 系数对模拟精度进行验证,如表 6 所示。

 Table 6. Kappa accuracy and overall accuracy values before and after integrated feedback

 表 6. 一体化反馈前后 Kappa 精度及总体精度值

2020 年模拟土地利用	Kappa 精度	总体精度
无一体化反馈	0.795193	0.893272
有一体化反馈	0.893001	0.915631

结果表明,一体化前的 Kappa 精度及总体精度值比较低,一体化后的参数设置更加合理,土地利用 模拟精度更高,结果可信度较高,可进一步模拟优化未来土地利用空间分布。

3.4. 基于 FLUS 模拟结果的不同情景碳排放分析

3.4.1. 土地利用碳排放分析

计算出不同情景下各类用地的土地利用碳排放值后,碳源用地、碳汇用地的碳排放与碳吸收量如 图 3 所示。





从土地利用碳排放角度来看,经济发展优先情景下土地碳排放最多,达185.51万吨,生态保护优先 情景下土地碳排放最少,为161万吨,碳排放的主要来源是建设用地。

从土地利用碳吸收角度来看,生态保护优先情景的碳汇最高,达4.25万吨,其次为自然发展情景, 碳汇为4.14万吨,考虑到耕地保护优先和经济发展优先情景下,耕地和建设用地扩张侵占了林地与草地 用地。但林地用地作为碳汇而存在,发挥了比较大的碳吸收的作用,所以,减少土地利用碳排放的重点 在于抑制城市用地的扩张,增大林地面积。

3.4.2. 交通碳排放分析

分别计算四种情景下不同大区的交通碳排放,根据计算结果得出对比图,如图4所示。



Figure 4. Comparison of transport carbon emissions by scenario in different transport regions 图 4. 不同交通大区各情景交通碳排放量对比图

从图 4 可以发现,四种情景下交通碳排放趋势相似,凤池大区排放最高,其次是藻溪和仙居大区, 这些地区位于苍南县北部,人口密集,是碳减排重点区域。宜山和凤阳大区交通碳排放较少,主要是因 为地形和人口稀疏,且居民更多依赖公共交通。

在不同发展情景中,经济发展优先情景下交通碳排放达 35.03 万吨,比自然发展情景高约 3 万吨。 这表明经济发展导致交通需求增加,碳排放显著上升。即使在生态保护优先情景下,交通碳排放也达 34.11 万吨,显示土地利用集中和交通网络优化不足仍然导致较高排放。综上,土地利用对交通碳排放 影响显著。

3.4.3. 交通与土地利用一体化碳排放综合分析

完成交通与土地利用一体化系统下的土地利用碳排放量与交通碳排放量的分析,接着综合考虑二者 之间的关系,以评估不同发展情景下的整体碳排放影响,所得结果如表 7 所示。

 Table 7. Total carbon emissions from transport and net carbon emissions from land use for different scenarios in Cangnan County in 2035 (tonnes)

	自然发展	耕地保护优先	生态保护优先	经济发展优先
交通碳排放	32.13	30.66	34.11	35.03
土地利用净碳排放	174.22	161.25	156.75	181.44
碳排放总和	206.35	191.90	190.86	216.46

表 7.2035 年苍南县不同情景交通碳排放与土地利用净碳排放量总和(万吨)

从碳排放总量来看,经济发展优先情景下的碳排放总量最高,主要原因在于建设用地的大幅度扩张 导致土地利用碳排放上升,林地和其他碳汇用地转换为建设用地,导致地区碳吸收和碳储存能力下降, 同时建设活动本身也会产生大量的碳排放,使得经济发展优先情景下的土地利用碳排放量最高,由于交 通碳排放在碳排放总量中的比例相对较小,即使经济发展优先情景下的交通碳排放不是最大,但碳排放 总量处于最高值。其次是自然发展情景,碳排放总量达 206.35 万吨,比耕地保护优先情景及生态保护优 先情景高出 5%左右,自然发展情景下的土地利用变化遵循现有的趋势和历史数据,是土地资源的自发变 化。耕地保护优先情景与生态保护优先情景总碳排放值相差不大,但在交通碳排放和土地利用碳排放却 有显著差别,将交通碳排放和土地利用碳排放用柱状图表示如图 5 所示。



Figure 5. Transport carbon emissions versus land use carbon emissions for different scenarios **图 5.** 不同情景交通碳排放与土地利用碳排放对比图

从图中可以看出,2035年模拟苍南县四种情景下的交通碳排放量与土地利用碳排放量总体趋势基本 一致,其根本原因还是在于土地利用变化和交通系统的密切联系,建设用地的分布影响着交通需求和出 行模式,交通系统的布局和效率往往又是建设用地扩张的催化剂,进而影响了土地利用碳排放及交通碳 排放。

但是在生态保护优先情景下,土地利用碳排放虽然最少,交通碳排放却异常增高,结合前文土地利

用空间布局分布以及交通网络成本矩阵分析,主要原因在于生态保护优先情景下,由自适应惯性竞争机 制推动的土地利用变化使得原来林地、草地用地转换为建设用地的概率大大降低,也就是说该情景下建 设用地更加集中在原人口密度很高的北部建设中心区,路段交通饱和度变高,地区交通堵塞情况严重, 并且建设用地的过于集中也引起了交通需求和出行模式的改变。

4. 结论

本文在前人对交通与土地利用一体化的研究基础之上,考虑到研究尺度的问题,将视角转向国土空间规划层面,研究交通碳排放与土地利用碳排放之间的关系,并提出考虑了交通网络对土地利用空间布局结构影响的一体化框架,形成国土空间规划视角下区域交通与土地利用相互反馈的闭环系统。在此基础之上,利用 GeoSOS-FLUS 模型模拟预测了 2035 年苍南县不同一体化情景,分析不同情景下的交通碳排放与土地利用碳排放的关联性与影响因素,探究适合区域可持续发展的对策,主要研究结论如下:

1) 交通与土地利用的相互反馈不可或缺。本文从国土空间规划视角出发,通过改变可达性因子与成本矩阵、邻域因子构建了国土空间规划视角下区域交通与土地利用一体化模型,对一体化反馈前后的土地利用模拟结果进行精度验证,发现无一体化反馈的 Kappa 精度为 0.795,总体精度达 0.893,而在一体化反馈下的 Kappa 精度达 0.893,总体精度为 0.915,证明加入了交通与土地利用一体化反馈的土地利用 模拟效果更好。因此,考虑二者的相互反馈机制是制定区域发展战略的关键。

2) 区域土地利用发展格局与国土空间规划政策紧密相关。通过对历史年研究区土地利用时空转变特征的分析,发现不同时间段土地流转率、土地数量结构特征等均有显著的差异,这些差异不仅反映了区域发展的自然经济条件和社会需求的变化,也与该地区实施的国土空间规划政策密切相关。在经济发展迅速的时期,为了满足工业化和城市化的需求,农业用地和草地频繁转换为建设用地;在耕地保护政策实施期间,为保护耕地资源,非农业建设用地被限制扩张,农业用地相对稳定或逐步增加;在近年来环保政策加强的年代,建设用地增长放缓,林地等碳汇用地面积增加,表明政策制定者在推动经济发展的同时,越来越重视生态平衡和环境质量的保护。

3) 交通碳排放与土地利用碳排放需同步考虑。通过对研究区不同情景下的交通碳排放与土地利用碳 排放计算发现,从土地利用的角度,减少碳排放的关键是保护森林、湿地和草地等自然生态系统,增强 区域的碳汇功能,从交通的角度出发,优化出行结构、发展新能源车辆是减少交通碳排放的有效手段。 在实际情况中,交通与土地利用之间存在复杂的互动关系,共同影响区域的可持续发展,在国土空间规 划过程中,在确保林地等碳汇用地数量的同时,还要保证建设用地在空间上的合理分配,防止建设用地 过度集中造成交通拥堵等问题。

参考文献

- [1] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [2] 邵海琴, 王兆峰. 中国交通碳排放效率的空间关联网络结构及其影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(4): 32-41.
- [3] 陆阳子. 国土空间规划体系下的综合交通规划编制思考建议[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(22): 10-12.
- [4] 叶宇, 庄宇. 新区空间形态与活力的演化假说:基于街道可达性、建筑密度和形态以及功能混合度的整合分析 [J]. 国际城市规划, 2017, 32(2): 43-49.
- [5] 毛蒋兴. 高密度开发城市交通系统对土地利用的影响作用研究——以广州为例[J]. 经济地理, 2005, 25(2): 185-188+210.
- [6] 赵童. 国外城市土地使用——交通系统一体化模型[J]. 经济地理, 2000, 20(6): 79-83+128.
- [7] Wu, B.M., Birkin, M.H. and Rees, P.H. (2008) A Spatial Microsimulation Model with Student Agents. Computers, Environment and Urban Systems, 32, 440-453. <u>https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.013</u>

- [8] 吴迪, 渠立权. 江苏省土地城镇化的空间分异及定量预测[J]. 自然资源情报, 2022(12): 38-44.
- [9] de Nijs, T.C.M., de Niet, R. and Crommentuijn, L. (2004) Constructing Land-Use Maps of the Netherlands in 2030. *Journal of Environmental Management*, 72, 35-42. <u>https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.03.015</u>
- [10] 江山,石旭飞,郭常来等. 基于 CA-Markov 模型的大凌河流域土地利用变化与模拟预测研究[J]. 地质与资源, 2023, 32(5): 624-32.
- [11] 余威,何蒲明. 基于 GeoSOS-FLUS 模型的荆州市生态安全评估[J]. 天津农业科学, 2024, 30(2): 47-54.
- [12] 郭佳晖, 刘晓煌, 张文博, 等. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的云贵高原产水量时空变化特征分析[J]. 现代地质, 2024, 38(3): 624-635.
- [13] Feng, K., Hubacek, K. and Guan, D. (2009) Lifestyles, Technology and CO₂ Emissions in China: A Regional Comparative Analysis. *Ecological Economics*, 69, 145-154. <u>https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.08.007</u>
- [14] 杨翱, 刘纪显, 吴兴弈. 基于 DSGE 模型的碳减排目标和碳排放政策效应研究[J]. 资源科学, 2014, 36(7): 1452-1461.
- [15] 杨皓然, 吴群. 不同政策方案下的南京市土地利用碳排放动态模拟[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(3): 121-126.
- [16] Zhang, R., Matsushima, K. and Kobayashi, K. (2018) Can Land Use Planning Help Mitigate Transport-Related Carbon Emissions? A Case of Changzhou. *Land Use Policy*, 74, 32-40. <u>https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.04.025</u>
- [17] 杨文越,曹小曙.居住自选择视角下的广州出行碳排放影响机理[J].地理学报,2018,73(2):346-361.
- [18] Shen, Y., Lin, Y., Cui, S., Li, Y. and Zhai, X. (2022) Crucial Factors of the Built Environment for Mitigating Carbon Emissions. Science of the Total Environment, 806, Article ID: 150864. <u>https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150864</u>
- [19] Chow, A.S.Y. (2016) Spatial-Modal Scenarios of Greenhouse Gas Emissions from Commuting in Hong Kong. *Journal of Transport Geography*, 54, 205-213. <u>https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.06.001</u>
- [20] Tan, X., Tu, T., Gu, B. and Zeng, Y. (2021) Scenario Simulation of CO₂ Emissions from Light-Duty Passenger Vehicles under Land Use-Transport Planning: A Case of Shenzhen International Low Carbon City. *Sustainable Cities and Society*, 75, Article ID: 103266. <u>https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103266</u>
- [21] 王胜蓝,周宝同.重庆市土地利用碳排放空间关联分析[J].西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(4): 94-101.
- [22] 陈肖雨. 不同空间尺度下交通碳排放测算及其网络结构特征研究——以云南省为例[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [23] 李井浩,柳书俊,王志杰.基于 FLUS 和 InVEST 模型的云贵高原土地利用与生态系统服务时空变化多情景模拟研究[J].水土保持研究,2024,31(3):287-298.