

常铭鑫, 曾晨, 解鹏, 等. 多情景下的土地利用模拟与特征分析: 以武汉市为例[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(4): 74-85.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.04.009

多情景下的土地利用模拟与特征分析: 以武汉市为例

常铭鑫¹, 曾晨¹, 解鹏², 刘述密¹

1. 华中农业大学公共管理学院/华中农业大学国土空间治理与绿色发展研究中心, 武汉 430070;
2. 山东理工大学建筑工程学院, 淄博 255000

摘要 为寻求国土空间最优碳减排路径, 实现低碳绿色型国土空间格局优化, 以武汉市作为案例区, 采用线性规划与Markov模型, 形成不同情景下武汉市2035年土地利用结构, 将空间自相关效应融入到元胞自动机模型, 模拟不同用地结构下的土地利用空间布局, 分析未来不同用地结构与空间布局下的碳排放, 提出低碳土地利用模式。结果显示: 自然发展情景和经济优先情景下, 建设用地和耕地面积有明显变动, 总碳排放量分别增加8.25%和29.06%; 低碳导向情景下, 建设用地增速放缓, 林地明显增加, 总碳排放量增加5.46%。从空间形态上来看, 自然发展和经济优先情景下的建设用地围绕中心城区向外扩张态势明显, 远城区零散建设用地逐步合并; 低碳导向情景下建设用地增加受限, 远城区林地增加明显, 多生态绿楔和生态廊道的全域生态框架逐步成型。以上结果表明, 不同情景下的模拟结果均能表现不同发展策略对武汉市国土空间格局的影响, 强调经济效益最大化的经济优先情景碳排放情况不容乐观, 融入低碳理念的国土空间开发与保护新格局能够在实现绿色减碳目标的同时兼顾经济增长速度。

关键词 碳排放; 国土空间优化; 土地利用; 情景模拟

中图分类号 F301.0; X171.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)04-0074-12

20世纪以来, 全球经济持续增长, 工业化、城市化进程加快, 大气含碳温室气体排放量持续增加, 气候环境问题日益突出。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第6次评估报告指出, 气候变化是100多年以来不可持续的能源和土地利用、生活方式以及消费和生产模式导致的结果, 加快采取相关气候行动, 对于减缓和适应气候变化影响, 实现可持续发展至关重要^[1]。土地既是森林等主要碳汇地类的自然载体, 也是人类生产活动的碳源载体, 气候变化背景下土地利用视角的碳排放和吸收估算对于探索低碳导向的自然资源管理与国土空间治理模式非常重要^[2-5]。2021年9月, 中共中央国务院联合发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》, 指出应强化绿色低碳发展规划引领, 优化绿色低碳发展区域布局, 构建有利于碳达峰、碳中和的国土空间开发保护新格局。近年来, 我国快速城镇化

和工业化进程导致土地利用剧烈变化, 城镇建设用地无序扩张和生态空间的快速退化显著增加了我国碳排放量^[6], 构建低碳型国土空间格局, 制定碳减排策略对实现“双碳”目标, 增强适应气候变化能力具有重要现实意义。

土地利用变化与碳排放的相关议题已经受到国内外学者的广泛关注, 相关研究主要有碳源碳汇现状分析^[7]、土地利用变化碳排放影响机制^[8-9]、土地利用碳排放量预测^[10]等方面, 特别是将碳源碳汇核算与土地利用结构预测和空间布局模拟相结合的研究, 正逐渐成为当前研究热点问题。在土地利用结构预测方面, 情景设置、目标函数与约束条件体系构建是用地结构预测的重要内容。由于线性规划、多目标规划和Markov等数理模型具有建模简单、目标明确、算法稳定、易于实现等优点^[11], 相关学者基于此类数理模型进行了大量不同情景下用地数量结构预测研究。其中, 不同情景的设置与线性规划模型

收稿日期: 2023-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171262; 42211530079); 华中农业大学自主创新基金项目(2662021JC002); 中国人民大学教育基金会林增杰土地科学发展基金优秀学术论文资助项目(2022)

常铭鑫, E-mail: hzaugglcmx@126.com

通信作者: 曾晨, E-mail: zengchen@igsrr.ac.cn

不同效益目标权重的差异化设置往往有较强的关联性^[12],随着模型的广泛应用,研究涉及的未来发展情景虽不断丰富,但主要优化目标仍集中于经济效益和生态效益目标^[13]。在约束条件设置方面,初期研究主要聚焦于较基础的土地利用宏观控制约束,随着不同发展导向与政策要求的实行与提出,相关研究逐步向纳入新时期多维约束条件变化以适应最新发展要求,但部分研究仍存在土地利用规划数值宏观约束设置科学性不足、与规划文本关联性较弱等情况^[14],难以准确、合理地实现未来用地数量结构的预测。在土地利用空间优化模拟方面,诸多学者围绕模型优化、模拟对象与模拟情景完善等方面开展了大量研究。在模型优化方面,传统元胞自动机(CA)模型由于在空间模拟上的独特优势成为后续许多空间模拟模型的基础,众多学者基于不同的转换规则挖掘模型(如Logistic回归^[15]、神经网络ANN^[16]等)与模拟思路,开发了FLUS^[16]、SLEUTH^[17]、CLUE-S^[18]等模型对国土空间格局进行模拟,这些模型集中于约束条件设计以及影响因子及其智能获取方法、改进元胞自动机的模拟效果^[19],但忽略了区域内部可能存在的一些空间关联效应,模型模拟精度有进一步改善的空间。模型优化的另一重要方面是地类转换驱动因子的选择,驱动因子涵盖层面的广度和数量的提升能较明显改善模型模拟精度,目前已形成了较完善的驱动因子体系,主要涵盖自然地形、社会经济、交通区位等方面^[12,16]。在模拟对象与模拟情景完善方面,已有研究逐步从建设用地、耕地等单一地类向全要素国土空间预测模拟演进,模拟优化也由单一的自然发展情景,向涵盖耕地保护情景、生态优先情景、资源保护情景的对比研究发展^[12,15,17]。

总体而言,过去在土地利用与碳排放的关联机制与测算评估、土地利用格局模拟预测与优化研究等领域成果较为丰富,但与减排增汇相关的研究多聚焦于土地利用视角下碳排放现状的评估与影响机制分析,看重经济与生态效益目标和宏观约束条件,仍存在发展目标考虑不全面、数量结构约束单一、模型模拟精度有待提升等问题。在我国各级国土空间规划的制定和实施过程中,如何在市域尺度上将“双碳”战略目标有机结合到国土空间格局构建中,寻求国土空间最优碳减排路径,实现低碳绿色型国土空间格局的优化有待进一步探索。因此,本研究聚焦“双碳背景下市域尺度的低碳国土空间格局构建”问

题,以“提出问题一定性分析一定量预测一特征分析”为研究主线,选取武汉市为案例研究区,在充分分析武汉市规划文本与图件的基础上,通过产业与用地空间匹配关系核算2020年各类用地碳排放系数,设置碳减排目标、经济发展目标和多种约束,预测2035年土地利用结构,基于纳入空间自相关效应的元胞自动机模型进行土地利用空间布局模拟,并对比不同发展情景下碳排放差异,以期为低碳国土空间格局构建提供对策建议。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区域与数据来源

武汉市是中国中部特大城市、国家中心城市和副省级城市,也是国家“低碳城市”试点以及“两型社会”改革试点区域(图1)。全市下辖13个区,总面积8 569.15 km²,截至2021年,常住人口1 364.89万人,城镇化率84.56%。2022年,武汉市地区生产总值达18 866.43亿元。经济快速发展背景下,武汉市建设用地迅速扩张,加剧了耕地资源和大量生态用地的流失,导致区域控碳减排压力不断增加。在“双碳”目标下,武汉市承担着中部绿色崛起和长江经济带绿色发展两大国家级战略的重要使命,并在推动自身及周边城市绿色低碳道路发展上的作用日益突出。因此,本研究选择武汉市作为案例研究区,

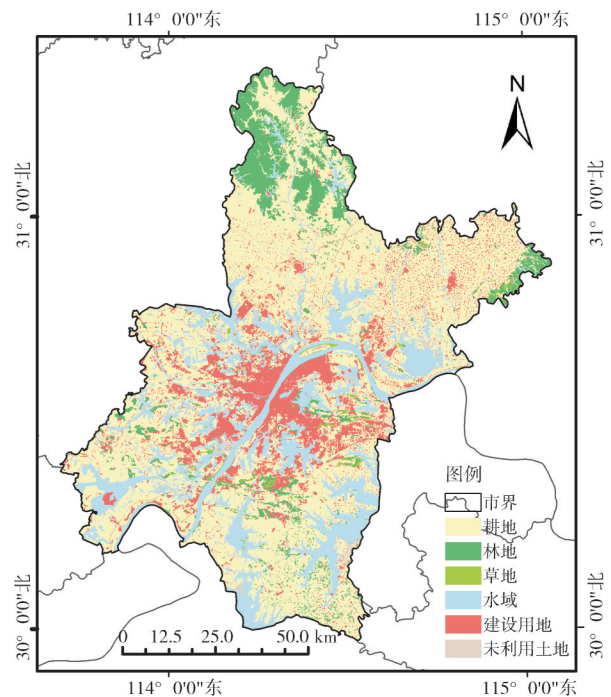


图1 研究区域

Fig.1 Research area

探讨武汉市碳减排目标下的国土空间格局优化方案。

研究采用的主要数据包括中国城市温室气体工作平台(CCG)所提供的中国城市二氧化碳排放数据

集以及武汉市土地利用数据,同时还包括多时段的自然地理和社会经济数据,具体数据说明如表1所示。既有数据已更新至可获取和实验需求的最佳年份,数据处理基于 ArcGIS 10.6 平台进行。

表1 研究所用数据说明

Table 1 Data description of the study

名称 Name	年份 Year	来源 Source	说明 Description
武汉市土地利用数据	2000—2020	地理国情监测云平台(http://www.dsac.cn/Data-Product/Index/200804)	模型基础输入数据(栅格数据 30 m×30 m)
高程	2013	地理国情监测云平台(http://www.dsac.cn/Data-Product/Detail/200820)	
坡度	2013	根据高程计算得出	自然要素驱动力因子 (栅格数据 1 km×1 km)
土壤相关数据(土壤容重、土壤酸碱度、土壤有机碳含量)	2009	世界土壤数据库(http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/)	
人口密度	2020	WorldPop(https://www.worldpop.org/)	社会经济驱动力因子 (栅格数据 1 km×1 km)
夜间灯光数据	2020	武汉大学珞珈一号01星(http://59.175.109.173:8888/app/login.html)	
交通路网数据(铁路、国道、主干道、高速)	2020	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/Default.aspx)	交通区位驱动力因子(矢量数据)
地铁站点	2020	百度 API 平台(http://lbsyun.baidu.com/index.php?title=lbscloud)	
武汉市主要商圈	2020		社会经济驱动力因子(矢量数据)
国家级自然保护区	2018	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/Default.aspx)	限制转化区域确定(矢量数据)
常住人口数量	2000—2020		约束条件设置(文本)
GDP	2010—2020	武汉统计年鉴2010—2021年	
农林牧渔产业增加值	2000—2020		经济效益系数确定(文本)
中国城市二氧化碳排放数据集	2005、2010、2015、2020	中国城市温室气体工作组(http://www.cityghg.com/)	城市碳排放系数确定(表格)

1.2 研究方法

在充分分析既有文献、政策文本和规划图件等材料的基础上,研究主要基于用地数量结构预测、用地空间布局模拟、情景模拟结果特征分析与优化策略归纳总结三部分展开分析。(1)用地数量结构预测。根据未来发展需求与城市基本情况,设置自然发展情景、低碳导向情景和经济优先情景。其中,自然发展情景下的用地数量结构基于 Markov 模型获取。低碳导向情景与经济优先情景下的用地数量结构基于考虑碳减排目标的线性规划模型求取。(2)用地空间布局模拟。首先,以自然条件、社会经济、交通区位作为土地利用转换的驱动力因子,基于人工神经网络模型获取地类转换适宜性图层,结合自然保护区等限制性图层、空间自相关效应图层生成综合转换概率图层。最后,基于元胞自动机模型进行多情景空间布局模拟。(3)情景模拟结果特征分析与优化策略归纳总结。分析不同情景下地类变化与碳

排放等指标变化情况,归纳总结未来土地利用布局优化策略,具体研究思路见图2。

1) 多情景用地数量结构预测。用地数量结构预测主要包括碳源碳汇系数获取和数量结构预测两部分。碳源碳汇系数获取部分中,林地、草地、水域、未利用土地碳汇能力受到气候、土壤等多种自然因素影响,短期内不会发生显著变化^[20-21]。其碳排放量基于已有经验系数,采用碳汇系数法进行核算:

$$C_i = K_i \times S_i \quad (1)$$

其中, C_i 表示*i*种地类碳排放量,kg; K_i 表示*i*种地类碳排放系数,kg/m²; S_i 表示*i*种地类面积,m²。

耕地与建设用地碳排放能力与其承载产业类型、人类活动强度有密切关系,其碳排放量处于不断地变化中^[22-24]。研究利用已有二氧化碳排放数据集,在挖掘耕地/建设用地历史碳排放量时序变化规律的基础上,通过专家问询等方式进行碳排放量与地类的匹配,将农业产生的碳排放归于耕地,服务业、工业、生活、交通和能源产生的碳排放归于建设

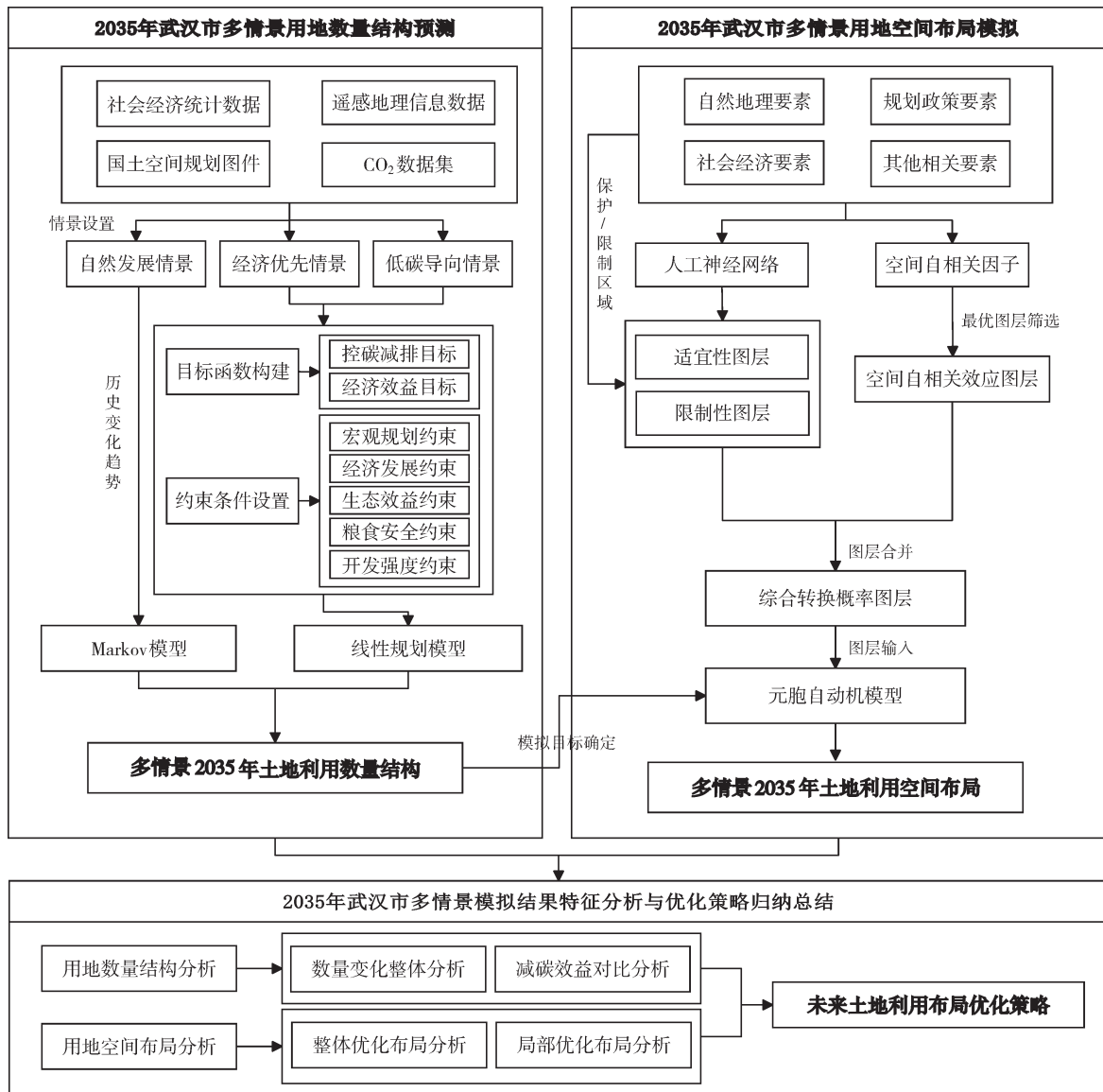


图2 技术路线图

Fig.2 Technical routine

用地,以“碳排放量/地类面积”分别求算2005、2010、2015、2020年耕地与建设用地的碳排放系数,预测2035年耕地与建设用地碳排放系数。

用地数量结构预测模型主要包括马尔可夫(Markov)和线性规划模型。Markov模型通过得到土地利用面积转移矩阵,计算转移概率来确定不同土地利用之间的转换趋势^[25]。线性规划模型是土地利用结构数量优化研究的重要模型,一般包含决策变量、目标函数和约束条件三部分^[11]。基本公式如下:

$$F(x) = \min(\max) \sum_{j=1}^n K_j(E_j) \times x_j \quad (2)$$

$$G(x) = \sum_{j=1}^n a_{ij}, x_j = (\geq, \leq) b_j, (i = 1, 2, 3 \dots, m) \quad (3)$$

其中, $F(x)$ 为碳排放量或经济效益; x_j 表示第 j 类决策变量($j=1, 2, 3, \dots, 6$), $x_j \geq 0$; K_j 为优化后的不同用地的碳排放; E_j 为经济效益系数; $G(x)$ 为约束条件, a_{ij} 为第 i 个约束条件中第 j 个变量对应的系数; b_j 为约束值。

基于武汉市2000—2020年土地利用变化情况、《武汉市国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》等规划文件,以2035年为目标年,设定3种发展情景、目标函数和相关约束条件:

(1)情景一(自然发展情景):基于2000—2020年土地利用变化数据,考虑历史土地利用变化速度和

趋势、结合多地类管控措施和发展政策,遵循土地利用自然演变规律,获取2035年土地利用数量结构。

(2)情景二(低碳导向情景):在气候形势严峻、“双碳”目标成为国家重大战略需求的大背景下,充分发挥高碳汇地类的减碳效益,以碳排放量为优化目标,强化生态用地保护,提升区域整体碳汇能力,合理增加建设用地面积,严格限制高碳排放地类无序扩张。

(3)情景三(经济优先情景):在城镇化、工业化进程加快的背景下,充分发挥经济产出潜力较高的土地利用效益,以经济效益作为优化目标,适当提升地区生产总值年均增速,保证最低粮食需求与生态

效益,增加建设用地,合理开发未利用土地,促进城镇化率提升。

基于文献[26-29]获取林地、草地、水域、未利用土地碳排放系数。基于已有碳排放数据集设置耕地与建设用地碳排放系数。经济优先情景下各地类经济效益系数根据2005—2020年不同地类经济产出,基于灰色预测模型确定2035年经济效益系数。非建设用地主要考虑农、林、牧、渔等产业增加值;建设用地考虑第二、三产业增加值;未利用土地不存在任何经济活动,经济效益系数为0^[29]。2035年武汉市各地类碳排放系数与经济效益系数见表2,基于系数预测值与线性规划模型,设置目标函数。

表2 不同地类碳排放系数与经济效益系数

Table 2 The coefficients of carbon emissions and economic benefits of different land types

系数 Coefficients	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用土地 Unused land
碳排放系数/(kg/m ²) Carbon emissions coefficients	0.156 1	-0.057 8	-0.002 1	-0.025 2	53.106 5	-0.000 5
经济效益系数/(万元/km ²) Economic benefits coefficients	1 245.55	194.85	10 657.29	636.49	231 524.07	0

$$F_{\min}(X) = 0.1561X_1 - 0.0578X_2 - 0.0021X_3 - 0.0252X_4 + 53.1065X_5 - 0.0005X_6 \quad (4)$$

$$F_{\max}(X) = 1245.55X_1 + 194.85X_2 + 10657.29X_3 + 636.49X_4 + 231524.07X_5 + 0X_6 \quad (5)$$

其中, $F_{\min}(X)$ 表示以碳排放量最小化为优化目标; $F_{\max}(X)$ 表示以经济效益最大化为优化目标; X_i 表示不同地类。

以现状地类为基础,将6种土地利用类型耕地(X_1)、林地(X_2)、草地(X_3)、水域(X_4)、建设用地(X_5)和未利用土地(X_6)作为决策变量;基于优化后的碳排放系数、经济效益系数设置目标函数;基于相关规划文件,粮食基本需求、生态效益等指标设置约束条件(表3)。耕地约束依据相关规划文件和历史耕地面积变化趋势设置为大于耕地保有量且耕地减少速率不高于前20 a减少速率,经济优先情景下适当放宽;林地约束基于历史林地变化规律与情景内涵,设置林地减少速率不高于前20 a减少速率;水域约束依据《武汉市湖泊保护条例》等文件对落实全市水域严格管理制度的要求设置为不低于2020年水域面积;建设用地约束基于未来规划人口与规划人均建设用地面积进行设置;草地与未利用土地基于历史土地利用面积变化速度设置。

在基本数量约束外,研究加入了经济发展目标约束、粮食安全约束、生态效益约束和开发强度约束

以期和未来发展目标与相关政策相契合。经济效益目标约束基于各地类经济效益系数与面积设置经济效益求算公式^[12],参考《武汉市国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035远景目标规划纲要》中地区年均生产总值增速设置为不低于以地区生产总值年均增速5%求算的2035年经济效益,经济优先情景适当提升;粮食安全约束以人均耕地面积和耕地需求量表示,基于2035年规划人口规模、耕地变化速度、粮食自给率、人均粮食需求量进行设置^[30-31];生态效益约束根据基于植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)修正的武汉市生态服务价值估算结果,求算不同地类生态服务价值以表示其生态效益,设置2035年各地类生态效益总和不低于2020年各地类生态效益总和^[32];开发强度约束系数参考国际宜居标准中的土地开发强度比例。

2)考虑空间关联的用地布局模拟。研究主要基于纳入人工神经网络和空间自相关效应的元胞自动机模型进行国土空间布局模拟。人工神经网络是一种通过模拟人脑基本特征形成的非线性动力学习网络系统^[33];元胞自动机是基于转换规则模拟复杂系统时空演化过程的一种网格统计动力模型^[33],可以有效表示非线性随机的土地利用变化过程。基于案例区现状和数据可获取性,选择高程、坡度、土壤相关因素(土壤容重、土壤酸碱度、土壤有机碳含量)、人

表3 约束条件
Table 3 Constraints

约束名称 Constraints name	约束因素 Constraints factors	约束表达式 Constraints expressions
总量约束	总面积	$\Sigma X_i = \text{总面积}$
	耕地面积	$X_1 \geq \text{耕地保有量}$
	林地面积	$X_2 \geq 2035 \text{年耕地预测面积}$
	草地面积	$X_3 < 2020 \text{年林地预测面积}$
		$X_3 \geq 2035 \text{年草地预测面积}$
		$X_4 \geq 2020 \text{年水域面积}$
规划目标约束	水域面积	$X_5 \leq 2035 \text{年规划人均建设用地面积} \times 2035 \text{年规划人口}$
	建设用地面积	$X_5 > 2025 \text{年规划人均建设用地面积} \times 2025 \text{年规划人口}$
	未利用土地面积	$X_6 < 2020 \text{年未利用土地面积}$
		$X_6 \geq 2035 \text{年未利用土地预测面积}$
经济发展目标约束	经济效益	$\Sigma E_i^{(1)} \times X_i \geq 2035 \text{年预期经济总量}$
粮食安全约束	人均耕地面积	$X_1 / 2035 \text{年规划人口规模} \geq \text{最小人均耕地面积}$
	耕地需求面积	$X_1 \geq \alpha \times (D / \beta \times Y) \times P^{(2)}$
生态效益约束	生态效益	$\Sigma F_i^{(3)} \times X_i \geq 2020 \text{年综合生态效益}$
开发强度约束	建设用地面积	$X_5 / \text{总面积} \leq 0.3$

注:(1) E_i 为不同地类经济效益系数;(2) α 为粮食自给率; D 为人均粮食需求量; β 为标准耕地粮食播种面积指数; Y 为粮食产量,kg/hm²; P 为武汉市2035年规划人口总量;(3) F_i 为不同地类生态效益系数。Note: (1) E_i is the economic benefits coefficient of different land use type; (2) α is the grain self-sufficiency ratio; D is the per-capita grain demand; β is the standard cultivated land grain sown area index; Y is the grain yield, kg/hm²; P is the total planning population of Wuhan in 2035; (3) F_i is the ecological benefits coefficient of different land use type.

口密度、GDP、与水系距离、与铁路距离、与国道距离、与主干道距离、与高速路距离、与地铁站点距离、与武汉市主要商圈距离14类因素作为地类转换驱动因子,通过人工神经网络生成适宜性转换图层。基于武汉市内自然保护区、自然保护水系等制作限制性转换图层。

既有空间模拟模型运行过程中缺乏对土地利用之间空间自相关关系的考量,导致部分模型模拟精度有待提升,针对土地利用之间存在的空间自相关效应^[34],研究通过引入空间自相关效应图层优化综合转换概率图层,使模拟结果精度检验Kappa指数由0.894上升至0.914,模拟精度明显提高。引入的空间自相关效应因子可表达为:

$$C_p = \sum_{p \neq j} w_{p,j} \times y_j / \sum_{p \neq j} w_{p,j} \quad (6)$$

其中, C_p 为元胞 p 上某一土地利用类型的空间自相关效应因子; j 为元胞 p 的邻域元胞; y_j 表示元胞 j 上该地类是否与 p 相同(相同为1,不同为0); $w_{p,j}$ 为元胞 p 和 j 的空间权重系数,当 p 和 j 间的距离小于阈值距离 d 时 $w_{p,j}=1/d$,否则 $w_{p,j}=0$ 。

模拟结果采用Kappa指数^[35]和ROC值^[36]进行模拟精度检验。Kappa指数与ROC值精度范围均为0~1,值越大表示模拟精度越高。

2 结果与分析

2.1 多情景土地利用结构优化结果

基于Lingo18.0软件,求取多情景土地利用结构(表4)并求算碳排放量、生态效益、经济效益(表5),6种地类数量均满足既有规划文件中提及的数量要求或同历史年份地类面积变化情况相符,均无较大变化与偏差。自然发展情景下,碳排放总量与2020年相比提高8.25%,经济效益提升116.60%,生态效益提升15.77%。就土地利用结构而言,耕地面积减少5.74%,林地、未利用土地面积有不同程度减少,水域面积较为稳定,建设用地面积较2020年增加25.44%。此情景下的土地利用结构变化体现了当前发展模式下的惯性趋势,武汉市在2020年前已实施了耕地保护、生态用地保护、控制建设用地无序扩张等政策措施,但从自然发展情景下的用地数量结构变化来看,基于当前政策的未来城市发展仍难以避免区域发展带来的生态环境损失。

低碳导向情景下,碳排放总量较2020年增加5.46%,经济效益提升111.06%,生态效益提升17.48%。此情景在完成基本经济增速目标的前提下,加强了对碳源地类的管控和碳汇地类的保护,碳

排放量有明显减少,整体生态效益为最高。主要碳汇地类林地面积较2020年增加24.14%,建设用地面积较2020年增加22.24%,并未大幅度增加。此情景下,城市规模扩张受到限制,整体空间布局向低碳减排方向演变,碳排放量较其他情景有明显减少,说明武汉市未来城市空间布局、生态环境保护等仍有优化空间。

经济优先情景下,碳排放总量较2020年增加29.06%,经济效益提升157.58%,生态效益提升

15.31%。此情景强调经济总量的增长幅度,经济效益提升最为明显,碳排放量增加最多。耕地较2020年减少10.16%,建设用地增加49.80%,林地、草地、水域、未利用土地均减少或保持不变。在经济效益最大化的目标下,经济增速的适当提升使空间布局向经济效益最大化的状态变化,此情景虽满足了武汉市粮食需求、生态效益不减少等方面的基本要求,但一味追求经济效益最大化导致碳排放量与生态效益均低于其他情景。

表4 不同情景下武汉市土地利用优化结构

Table 4 Land use optimization structure in Wuhan in different scenarios

变量 Variables	2020年 Year 2020	自然发展情景 Natural development scenario		低碳导向情景 Low-carbon oriented scenario		经济优先情景 Economic priority scenario	
		面积/km ² area	面积变化率/% Rates of area change	面积/km ² area	面积变化率/% Rates of area change	面积/km ² area	面积变化率/% Rates of area change
		耕地 Cultivated land	4 765.77	4 492.34	-5.74	4 365.8	-8.39
林地 Forest	777.52	770.2	-0.94	965.21	24.14	723.26	-6.98
草地 Grassland	64.86	63.04	-2.81	52.94	-18.38	64.86	0.00
水域 Water	1 722.37	1 716.77	-0.33	1 722.37	0.00	1 722.37	0.00
建设用地 Construction land	1 140.39	1 430.46	25.44	1 394	22.24	1 708.36	49.80
未利用土地 Unused land	70.91	69.01	-2.68	41.5	-41.48	41.5	-41.48
土地总面积 Total area	8 541.82	8 541.82	0	8 541.82	0	8 541.82	0

表5 不同情景下武汉市不同指标情况

Table 5 Different indices of Wuhan in different scenarios

指标名称 Index name	2020年 Year 2020	自然发展情景 Natural development scenario		低碳导向情景 Low-carbon oriented scenario		经济优先情景 Economic priority scenario	
		指标量 Amount	指标变化率/% Rates of index change	指标量 Amount	指标变化率/% Rates of index change	指标量 Amount	指标变化率/% Rates of index change
		经济效益/亿元 Economic benefits	15 637.82	33 871.03	116.60	33 004.49	111.06
生态效益/亿元 Ecological benefits	261.54	302.79	15.77	307.27	17.48	301.58	15.31
碳排放量/10 ⁴ t Carbon emissions	7 074.69	7 658.00	8.25	7 461.26	5.46	9 130.80	29.06

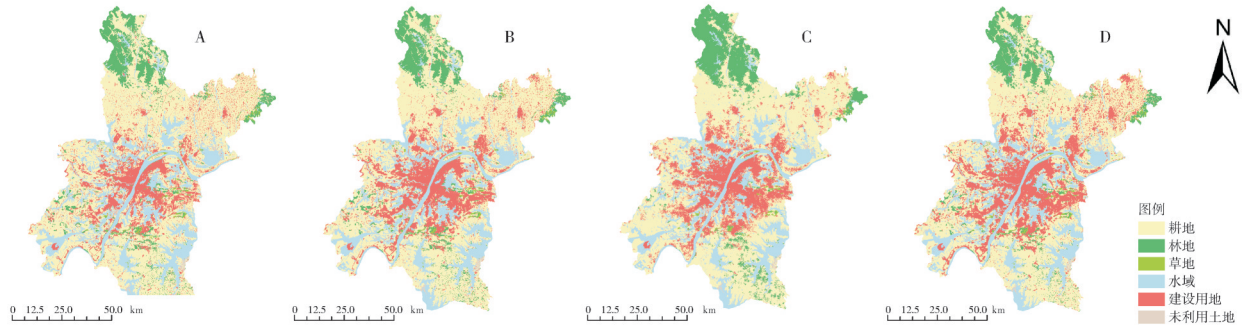
2.2 多情景土地利用空间布局优化结果

以2015年为基础,基于CA模型对研究区2020年土地利用空间布局进行模拟,经与2020年真实土地利用对比, Kappa=0.914、ROC曲线下的面积AUC=0.859,模型精度满足要求,故以2020年为基础,对2035年多情景土地利用空间布局进行模拟,整体优化结果见图3,局部优化结果见图4。

从整体优化结果来看,3种情景下的土地利用数

量结构均进行了空间合理分配。自然发展情景下建设用地围绕中心城区逐步外扩,外围重点镇及产业集中区逐步成片,但建设用地的大幅扩张导致中心城区周边的耕地与生态用地被不断压缩。此情景下远城区“满天星”状态的建设用地逐步合并,部分耕地得以恢复。

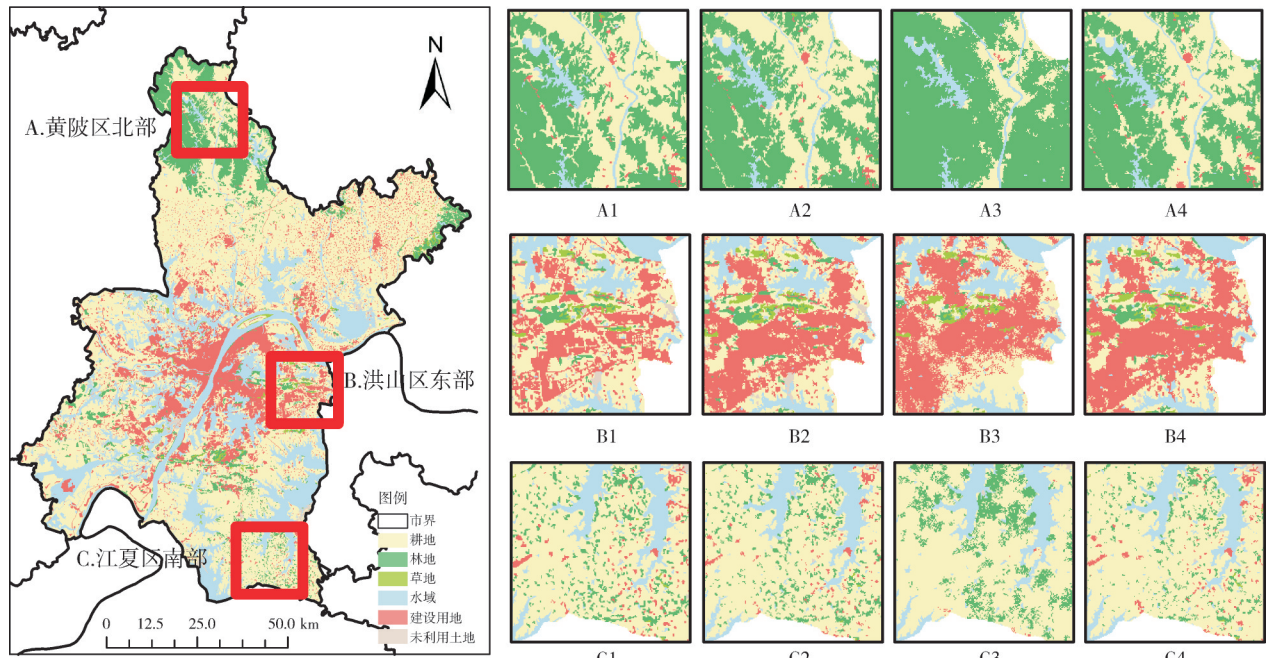
低碳导向情景下建设用地呈现出较弱的扩张态势,新增建设用地基本为在原建设用地基础上化零



A: 2020年现状 Land use status in 2020; B: 自然发展情景 Natural development scenario; C: 低碳导向情景 Low-carbon oriented scenario; D: 经济优先情景 Economic priority scenario.

图3 多情景武汉市整体土地利用优化布局

Fig.3 Land use optimization layout in Wuhan under different scenarios



A: 黄陂区北部 North of Huangpi District; B: 洪山区东部 East of Hongshan District; C: 江夏区南部 South of Jiangxia District; 1: 2020年现状 Land use status in 2020; 2: 自然发展情景 Natural development scenario; 3: 低碳导向情景 Low-carbon oriented scenario; 4: 经济优先情景 Economic priority scenario.

图4 多情景武汉市局部土地利用优化布局

Fig.4 Local land use optimization layout in Wuhan under different scenarios

为整如新洲区、黄陂区南部等,或由质量较低或零散的耕地转化而来。此情景下林地显著增加,原较为零散的林地同周边耕地退耕区域合并成为大量生态林区如黄陂区北部与江夏区南部等,生态减碳效果改善明显。

经济优先情景下多个区域的建设用地基于区域发展目标和土地适宜程度进行了重新排布,新增建设用地主要来源于城区附近耕地等地类的转换与低效闲置用地的整治。远城区较为明显的是新洲区中北部建设用地有了小幅扩张。同时,部分不适宜城

市建设或不符合发展目标的建设用地转为耕地、林地等。

选取重点保护山区黄陂区北部(图4A)、重要综合节点城区洪山区东部(图4B)、重点生态空间江夏区南部(图4C)分析局部优化结果。自然发展情景下,黄陂区北部整体空间布局稳定,说明此情景下武汉市现行的北部山区保护政策措施有较良好的后续影响,能够较好地保护北部林区基本生态格局;洪山区东部作为建设用地密集区,较2020年建设用地有明显的扩张、集聚现象,大量区域内耕地转化为建设

用地,林草地较为稳定;江夏区南部林地密度小幅下降,零散建设用地转化耕地,水域未发生明显变动。

低碳导向情景下,黄陂区北部作为“北峰南泽”生态格局的重要组成部分,耕地逐步退耕还林还草,林地大幅扩张,形成了大面积的生态绿色区域;江夏区南部与黄陂区北部类似,林地面积大量增加,原零散分布、面积较小的林地区域逐步合并,形成连接南部青菱湖生态绿楔与汤逊湖生态绿楔重要生态走廊;洪山区东部较2020年建设用地密度有较为明显的增加,与其他情景相比,此处建设用地密度的增加既保证了经济发展的需要,又不至于出现无序扩张、大量侵占生产生态用地的情况。

经济优先情景下,黄陂区北部林草地分布格局没有明显变化,少量耕地基于土地适宜性与规划发展需要转换为建设用地;洪山区东部作为未来建设科技创新中心与产业发展中心,其建设用地密度在3个情景中提升最大,此区域大量耕地与未利用土地由于城市空间扩张而转换为建设用地;江夏区南部出现了部分林地转化为耕地或建设用地的现象,区域林草地密度有所下降。

综合不同情景下土地利用结构预测与空间布局模拟结果来看,不同情景下的模拟结果均能表现不同发展策略对武汉市国土空间格局的影响。城市低碳国土空间格局的构建是各类用地在粮食安全和生态安全底线管控下的数量和空间上的博弈过程。无约束的自下而上局部用地转换以土地市场和产业布局的驱动为主,建设用地的选择优先级最高;有管控的自上而下土地利用变化以统筹区域的生态和社会经济效益为导向,林地和耕地具有强制性保护特征。自然发展情景和经济优先情景下,土地利用的碳排放量增加幅度较大,建设用地未来依然会存在扩张现象且经济优先情景更显著,尤其是中心城区内部耕地转换为建设用地的较多,远城区零散建设用地逐步实现空间合并,为都市圈建设和产业集群发展奠定基础;低碳导向情景下,土地利用结构向满足经济发展增速同时碳排放量最小的用地结构和布局变动,建设用地虽然依然呈现从中心城区向外扩张态势,但远城区和城郊地区的林地显著增加,原较为零散的林地成为大量成片的生态林区,城市内部集合生态源地、生态绿楔、生态廊道的生态网络格局逐步形成。未来建议结合低碳导向情景模拟结果进行土地利用结构和布局优化以保证经济增速的同时实现绿色低碳发展。

3 讨论

本研究以“提出问题-定性分析-定量预测-特征分析”为主线,针对当前土地利用变化视角下碳排放研究中存在的发展目标考虑不全面、数量结构约束单一、模拟模型精度有待提升等问题,综合采用线性规划、Markov和CA模型,设定3种发展情景,并在空间模拟过程中加入空间自相关效应,对武汉市2035年土地利用格局进行预测模拟。

气候变化背景下将控碳减排纳入国土空间优化中对探索气候变化下的国土空间减排路径具有重要意义。武汉市作为中国特大城市,其发展模式同其他超特大城市有一定相似性,因此,本研究对其他超特大城市的低碳绿色转型发展有一定参考价值。结合研究结果,提出以下3点优化对策。第一,在生态保护红线划定的基础上,逐步实施空间差异化的生态保护方案。在把控全域碳环境的稳定性和协调性的基础上,按照“北部山区保护、中心城区提升、南部湖区优化”的原则,一是通过制定相关政策严格保护承担重要碳汇功能的北部山区生态空间,针对黄陂区北部和新洲区东北部核心林区,严格禁止人类活动,引导周边和内部耕地和建设用地有序退出,推进山体更新造林,打造健康稳固的北部森林生态屏障;二要逐步提升中心城区碳汇贡献占比,强化城镇内部河湖湿地的保育修复,通过城市更新和全域土地整治等项目加强东湖、汤逊湖、严东湖等湖泊水系与城市内部绿地空间的连接,聚焦江岸、汉阳、洪山区等城镇快速扩张区的生态廊道建设,提升城区蓝绿空间的连通性和综合质量;三要推进武汉市南部湖区的用地结构优化,在梁子湖、斧头湖、鲁湖等周边营建沿湖林区,推进零散耕地逐步退出,打造河湖绿地交相呼应的南部生态空间。第二,通过国土空间用途管制和耕地多功能挖潜等方式,保障农业空间范围和实现耕地“数量-质量-生态”三位一体的空间差异性管控机制。加强耕地的集中连片保护,在黄陂区、新洲区、蔡甸区、东西湖区等城郊结合部地区,通过全域土地综合整治、高标准农田建设等项目,推进零散宅基地和废旧工矿用地的逐步退出,实现零散耕地的连接和集中整治或通过逐步引导零星耕地纳入城市内部绿色生态开敞空间实现统一管理,有效促进耕地的补充与布局优化和农村生活生产生态空间的连接。第三,构建集约高效、功能完善的城镇空间格局是规划目标的第三大模块,低碳导向情景模拟结果与规划图件划定的城镇空间也

基本一致,未来在推进城镇建设同时兼顾控碳减排的过程中,要在控制建设用地空间扩张的同时,推动产业用地的节约集约利用,结合城乡建设用地增减挂钩和耕地占补平衡等政策,实现区域城镇空间的紧凑型发展态势,另外通过制定城市内部绿色生态潜力空间的保护标准,通过“旧城更新”“拆违提效”等举措,推动周边存量建设用地的挖潜,加强内部碳源/汇地类的结构性调整。

由于建模复杂性的限制,本研究难以考虑市域内部不同地区对于建设用地的差异化需求,在后续研究中,应结合城市内部不同政策导致的地类差异化需求与城市和周边城市联动作用实现更精确的规划指导。由于研究数据的限制,本研究仅基于既有文献与已有碳排放数据估算某一地类单位碳排放量,并未考虑地类内部由于人口、工业、树木种类等所导致的碳排放强度内部差异性。在后续研究中,可以结合实地调研、问卷调查等方式对已有碳排放数据进行修正,以便更细致地指导气候变化背景下的国土空间规划。

参考文献 References

- [1] IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change[R]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022.
- [2] PIAO S L, HUANG M T, LIU Z, et al. Lower land-use emissions responsible for increased net land carbon sink during the slow warming period[J]. *Nature geoscience*, 2018, 11(10): 739-743.
- [3] 赵荣钦, 黄贤金, 鄢文聚, 等. 碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1123-1136. ZHAO R Q, HUANG X J, YUN W J, et al. Key issues in natural resource management under carbon emission peak and carbon neutrality targets[J]. *Journal of natural resources*, 2022, 37(5): 1123-1136 (in Chinese with English abstract).
- [4] HARPER A B, POWELL T, COX P M, et al. Land-use emissions play a critical role in land-based mitigation for Paris climate targets[J/OL]. *Nature communications*, 2018, 9: 2938 [2023-03-08]. <https://www.nature.com/articles/s41467-018-05340-z>. DOI: 10.1038/s41467-018-05340-z.
- [5] ZHANG X Y, JIAO K X, ZHANG J L, et al. A review on low carbon emissions projects of steel industry in the world[J/OL]. *Journal of cleaner production*, 2021, 306: 127259 [2023-03-08]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127259>.
- [6] LIU Z, DENG Z, HE G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China[J]. *Nature reviews earth & environment*, 2021, 3(2): 141-155.
- [7] TIAN S Q, WANG S J, BAI X Y, et al. Global patterns and changes of carbon emissions from land use during 1992-2015[J/OL]. *Environmental science and ecotechnology*, 2021, 7: 100108 [2023-03-08]. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2021.100108>.
- [8] 王睿, 张赫, 强文丽, 等. 基于城镇化的中国县级城市碳排放空间分布特征及影响因素[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(12): 1999-2010. WANG R, ZHANG H, QIANG W L, et al. Spatial characteristics and influencing factors of carbon emissions in county-level cities of China based on urbanization[J]. *Progress in geography*, 2021, 40(12): 1999-2010 (in Chinese with English abstract).
- [9] 孙艳芝, 沈镭, 钟帅, 等. 中国碳排放变化的驱动力效应分析[J]. *资源科学*, 2017, 39(12): 2265-2274. SUN Y Z, SHEN L, ZHONG S, et al. Driving force analysis of carbon emission changes in China[J]. *Resources science*, 2017, 39(12): 2265-2274 (in Chinese with English abstract).
- [10] 何海珊, 赵宇豪, 吴健生. 低碳导向下土地覆被演变模拟: 以深圳市为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(21): 8352-8363. HE H S, ZHAO Y H, WU J S. Simulation of urban landscape pattern under the influence of low carbon: a case study of Shenzhen[J]. *Acta ecologica sinica*, 2021, 41(21): 8352-8363 (in Chinese with English abstract).
- [11] 钱敏, 濮励杰, 朱明, 等. 土地利用结构优化研究综述[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(12): 1410-1415. QIAN M, PU L J, ZHU M, et al. Land utilization structure optimization: an overview[J]. *Resources and environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(12): 1410-1415 (in Chinese with English abstract).
- [12] 曹帅, 金晓斌, 杨绪红, 等. 耦合MOP与GeoSOS-FLUS模型的县级土地利用结构与布局复合优化[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(6): 1171-1185. CAO S, JIN X B, YANG X H, et al. Coupled MOP and GeoSOS-FLUS models research on optimization of land use structure and layout in Jintan District[J]. *Journal of natural resources*, 2019, 34(6): 1171-1185 (in Chinese with English abstract).
- [13] 赵寿露, 李石华, 许新惠, 等. 耦合MOP-FLUS模型的滇中城市群“三生”空间格局优化[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 322-328. ZHAO S L, LI S H, XU X H, et al. Production-life-ecological space pattern optimization of the urban agglomeration in central Yunnan based on coupled MOP and FLUS model[J]. *Research of soil and water conservation*, 2022, 29(4): 322-328 (in Chinese with English abstract).
- [14] HUANG S Q, XI F R, CHEN Y M, et al. Land use optimization and simulation of low-carbon-oriented: a case study of Jinhua, China[J/OL]. *Land*, 2021, 10(10): 1020 [2023-03-08]. <https://doi.org/10.3390/land10101020>.
- [15] DOMINGO D, PALKA G, HERSPERGER A M. Effect of zoning plans on urban land-use change: a multi-scenario simulation for supporting sustainable urban growth[J/OL]. *Sustainable cities and society*, 2021, 69: 102833 [2023-03-08]. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102833>.

- [16] LIU X P, LIANG X, LI X, 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.
- [17] 李海萍, 王语萌, 杜佳琪. 基于保护生态服务价值的县域城市扩展情景分析: 以浙江省安吉县为例 [J]. *生态学报*, 2022, 42 (19): 7858-7870. LI H P, WANG Y M, DU J Q. Scenario analysis of county expansion based on the value of ecological services: taking Anji County in Zhejiang Province as an example [J]. *Acta ecologica sinica*, 2022, 42 (19): 7858-7870 (in Chinese with English abstract).
- [18] LIAO G T, HE P, GAO X S, et al. Land use optimization of rural production-living-ecological space at different scales based on the BP-ANN and CLUE-S models [J/OL]. *Ecological indicators*, 2022, 137: 108710 [2023-03-08]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108710>.
- [19] 杨俊, 解鹏, 席建超, 等. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟: 以大连经济技术开发区为例 [J]. *地理学报*, 2015, 70 (3): 461-475. YANG J, XIE P, XI J C, et al. LUC simulation based on the cellular automata simulation: a case study of Dalian Economic and Technological Development Zone [J]. *Acta geographica sinica*, 2015, 70 (3): 461-475 (in Chinese with English abstract).
- [20] 匡耀求, 欧阳婷萍, 邹毅, 等. 广东省碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20 (12): 56-61. KUANG Y Q, OUYANG T P, ZOU Y, et al. Present situation of carbon source and sink and potential for increase of carbon sink in Guangdong Province [J]. *China population, resources and environment*, 2010, 20 (12): 56-61 (in Chinese with English abstract).
- [21] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究 [D]. 南京: 南京大学, 2010. LAI L. Carbon emission effect of land use in China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [22] 盖兆雪, 詹文羲, 王洪彦, 等. 耕地利用转型碳排放时空分异特征与形成机理研究 [J]. *农业机械学报*, 2022, 53 (7): 187-196. GAI Z X, ZHAN W X, WANG H Y, et al. Spatio-temporal differentiation characteristics and formation mechanism of carbon emission from cultivated land use transformation [J]. *Transactions of the CSAM*, 2022, 53 (7): 187-196 (in Chinese with English abstract).
- [23] LIU G, ZHANG F. How do trade-offs between urban expansion and ecological construction influence CO₂ emissions? New evidence from China [J/OL]. *Ecological indicators*, 2022, 141: 109070 [2023-03-08]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109070>.
- [24] 袁凯华, 梅昀, 陈银蓉, 等. 中国建设用地集约利用与碳排放效率的时空演变与影响机制 [J]. *资源科学*, 2017, 39 (10): 1882-1895. YUAN K H, MEI Y, CHEN Y R, et al. Temporal and spatial evolution and influencing mechanism of construction land intensive utilization on carbon emissions efficiency in China [J]. *Resources science*, 2017, 39 (10): 1882-1895 (in Chinese with English abstract).
- [25] WANG S W, MUNKHNASAN L, LEE W K. Land use and land cover change detection and prediction in Bhutan's high altitude city of Thimphu, using cellular automata and Markov chain [J/OL]. *Environmental challenges*, 2021, 2: 100017 [2023-03-08]. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100017>.
- [26] ZHANG C Y, ZHAO L, ZHANG H T, et al. Spatial-temporal characteristics of carbon emissions from land use change in Yellow River Delta Region, China [J/OL]. *Ecological indicators*, 2022, 136: 108623 [2023-03-08]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108623>.
- [27] 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 等. 中国土地利用碳排放变化及协调分区 [J]. *环境科学*, 2023, 44 (3): 1267-1276. LI Y Y, WEI W, ZHOU J J, et al. Changes in land use carbon emissions and coordinated zoning in China [J]. *Environmental science*, 2023, 44 (3): 1267-1276 (in Chinese with English abstract).
- [28] 黎孔清. 低碳经济导向的区域土地利用评价与结构优化研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2013. LI K Q. Evaluation and structural optimization of low-carbon economy-oriented regional land-use [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [29] 徐磊, 董捷, 张安录. 湖北省土地利用减碳增效系统仿真及结构优化研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25 (10): 1528-1536. XU L, DONG J, ZHANG A L. Study on simulation and structure optimization of land use carbon reduction and efficiency improvement system of Hubei Province [J]. *Resources and environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25 (10): 1528-1536 (in Chinese with English abstract).
- [30] 梁鑫源, 金晓斌, 孙瑞, 等. 多情景粮食安全底线约束下的中国耕地保护弹性空间 [J]. *地理学报*, 2022, 77 (3): 697-713. LIANG X Y, JIN X B, SUN R, et al. China's resilience-space for cultivated land protection under the restraint of multi-scenario food security bottom line [J]. *Acta geographica sinica*, 2022, 77 (3): 697-713 (in Chinese with English abstract).
- [31] 于昊辰, 曾思燕, 王庆宾, 等. 多情景模拟下新时代中国耕地保护底线预测 [J]. *资源科学*, 2021, 43 (6): 1222-1233. YU H C, ZENG S Y, WANG Q B, et al. Forecast on China's cultivated land protection baseline in the new era by multi-scenario simulations [J]. *Resources science*, 2021, 43 (6): 1222-1233 (in Chinese with English abstract).
- [32] 曾晨, 李扬镛, 段雪雯, 等. 长江流域中部地区生态系统服务价值评估与综合驱动力分析 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29 (2): 362-371. ZENG C, LI Y B, DUAN X W, et al. Assessment and driving force analysis of ecosystem service value in the urban agglomeration along the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Research of soil and water conservation*, 2022, 29 (2): 362-371 (in Chinese with English abstract).
- [33] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的单元自动机CA及真实和优化

- 的城市模拟[J].地理学报,2002,57(2):159-166.LI X, YE J A. Neural-network-based cellular automata for realistic and idealized urban simulation [J]. Acta geographica sinica, 2002, 57(2): 159-166 (in Chinese with English abstract).
- [34] 谢花林,刘黎明,李波,等.土地利用变化的多尺度空间自相关分析:以内蒙古翁牛特旗为例[J].地理学报,2006,61(4):389-400.XIE H L, LIU L M, LI B, et al. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land-use changes: a case study in ongnuid banner, inner Mongolia [J]. Acta geographica sinica, 2006, 61(4): 389-400 (in Chinese with English abstract).
- [35] COHEN J. A coefficient of agreement for nominal scales [J]. Educational and psychological measurement, 1960, 20 (1) : 37-46.
- [36] HANLEY J A, MCNEIL B J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve [J]. Radiology, 1982, 143(1): 29-36.

Land use simulation and characteristic analysis in multiple scenarios: a case study in Wuhan

CHANG Mingxin¹, ZENG Chen¹, XIE Peng², LIU Shumi¹

1. School of Public Administration/Research Center for Territorial Spatial Governance and Green Development, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. School of Civil Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

Abstract Land use change is an important factor that affects the carbon cycle process of terrestrial systems and climate change. In order to seek the optimal carbon emission reduction path for terrestrial space and realize the optimization of low-carbon green national land spatial pattern, this study selected Wuhan as a case study area. Based on linear programming and Markov model, the land use structure of Wuhan in 2035 under different scenarios was formed. The cellular automata model incorporating spatial autocorrelation effect was used to simulate the land use spatial layout based on different land use structures, then the carbon emissions in the future under different land use structures and spatial layouts was analyzed, and finally a low-carbon land use pattern that meets the future development goals of the city was proposed. The results showed that in the natural development scenario and the economic priority scenario, the construction land and cultivated land area will change significantly, and the total carbon emissions will increase by 8.25% and 29.06%, respectively. Under the low-carbon oriented scenario, the growth rate of construction land slowed down, the forest land increased significantly, and the total carbon emissions increased by 5.46%. From the perspective of spatial form, under the natural development scenario and the economic priority scenario, the construction land expands outward around the central urban area obviously, and the scattered construction land in the far urban area was gradually merged. Under the low-carbon oriented scenario, the increase of construction land was limited, the increase of forest land in the far urban area was obvious, and the ecological framework of multi-ecological green wedges and ecological corridors was gradually formed. The above results showed that the simulation results under different scenarios can all show the impact of different development strategies on the territorial spatial pattern of Wuhan. The carbon emissions situation of the economic priority scenario that emphasizes the maximization of economic benefits is not optimistic. The new pattern of national land space development and protection integrated with the low-carbon concept can achieve the goal of green carbon reduction while taking into account the speed of economic growth.

Keywords carbon emissions; national land space optimization; land use; scenario simulation

(责任编辑:边书京)