

南昌市土地利用低碳优化模拟研究

叶长盛, 袁壮壮, 胡梦珊

(东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013)

摘 要: 基于南昌市 2000 年、2005 年、2010 年、2017 年 4 期土地利用数据, 结合灰色多目标线性规划模型和 FLUS 模型, 对 2025 年土地利用数量结构及空间布局进行预测模拟, 探究低碳优化目标下城市土地利用变化趋势。结果表明: (1) 研究期间, 南昌市土地利用具有明显的“一升五降”特征, 建设用地和耕地是主要变化地类; 土地利用净碳排放量显著增加, 但年均碳排放增加量有所减少, 生态环境压力得到一定程度缓解。(2) 2025 年各地类结构更为均衡, 有效杜绝了某种地类出现的持续减少或增加的恶性循环结果; 优化后的土地利用结构, 碳汇较 2017 年增加了 2.04×10^4 t, 充分兼顾了多方利益, 有助于协调经济发展和环境保护二者之间的矛盾。(3) 在不同方位上, 各地类数量之间的比例得到显著优化; 2017—2025 年不同地类主趋势方向差异明显, 整体呈现西北—东南趋势。

关键词: 土地利用; 多目标线性规划; FLUS 模型; 低碳; 南昌市

中图分类号: F301.24(256)

文献标志码: A

文章编号: 1009-4210-(2021)05-025-15

Simulation Study on Low Carbon Optimization of Land Use in Nanchang City

YE Chang-sheng, YUAN Zhuang-zhuang, HU Meng-shan

(School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on the land use data of Nanchang City in 2000, 2005, 2010 and 2017, this paper used the grey multi-objective linear programming model and the FLUS model, made a predictive simulation on the quantitative structure and spatial layout of land use in 2025 to explore the changing trend of urban land use under the low-carbon optimization goal. The results were shown as follows: (1) during the study period, the land use in Nanchang City had an obvious characteristic of “one rise and five falls” with the construction land and cultivated land marking the main changing types of the land; the net carbon emission of land use increased significantly, but the annual increase of carbon emission decreased relatively, which

收稿日期: 2021-05-12; 改回日期: 2021-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(42061041); 江西省自然科学基金项目(20171BAA208025)

作者简介: 叶长盛(1977—), 男, 教授, 博士, 从事城乡发展、土地资源利用与保护研究。E-mail: ycs519@163.com

通信作者: 袁壮壮(1994—), 男, 硕士研究生, 从事土地利用变化与规划研究。E-mail: 2361838416@qq.com

meant that the pressure of ecological environment was alleviated to a certain extent; (2) in 2025, the structure of different land types would be more balanced, largely breaking the vicious circle in which the continuous decrease or increase of some certain land types; after the optimization of land use structure, carbon sink increased by 2.04×10^4 t, compared to 2017, which fully took into account the interests of all parties and would be conducive to coordinate the contradiction between economic development and environmental protection; (3) in different directions, a significant optimization was seen in the proportion among the number of different land types; from 2017 to 2025, the main trend direction of different land types had an obvious difference, showing an overall trend of northwest-southeast.

Key words: land use; multi-objective linear programming; FLUS model; low carbon; Nanchang city

土地作为人类生产生活的主要载体,伴随着人类经济活动的开展,其形态产生了剧烈变化^[1]。在此过程中带来的一系列生态环境问题,给当今社会带来了诸多影响。当前土地利用活动产生的碳排放量仅次于化石能源燃烧,是导致碳排放增加和气候变暖的主要原因之一^[2]。土地利用碳排放作为土地利用结构变化产生的负面结果,已经受到社会各界的广泛关注。近年来,习近平总书记提出“绿水青山就是金山银山”发展理念,追求经济与生态平衡已经成为社会共识,政府报告中亦明确指出我国在 2030 年及 2060 年将分别实现“碳达峰”和“碳中和”。因此,合理优化土地数量结构和空间布局,对社会的可持续及健康发展具有重要的理论和现实意义。

目前,国内外学者在土地利用碳排放量测算、驱动机制机理和不同情境模拟预测开展了广泛研究,取得了诸多研究成果。例如,众多学者采用不同方法核算了土地利用碳排放量,并就其时空演变特征进行了多层次讨论^[3],而随着探讨的日渐深入学者将研究视角转向驱动机制机理的探究,结果表明,经济活动对碳排放的增加具有显著的影响^[4]。同时,在全球变暖的背景下,越来越多的研究集中于土地利用碳排放量预测^[5]。土地利用变化模拟作为碳排放预测的基础,包括数量预测及空间布局,当下大多数学者的研究集中于其中一方面,研究结果科学性受限。例如,数量预测多采用线性规划、马尔科夫模型^[6-9]等,预测结果未能考虑社会、生态的限制性因素,不利于城市的可持续发展;空间模拟基于数量预测的基础,元胞自动机模型、CLUS 模型、FLUS 模型得到广泛应用。低碳导向的土地利用优化以“低碳”为目标,核心是降低土地利用碳排放总量,通过对土地利用结构进行调整,优化空间布局,最终实现自然、经济和社会的可持续发展,促进低碳土地利用^[10]。现阶段,多数学者的研究集中于土地利用经济效益最大化,忽略了土地利用的生态及社会价值,而有研究显示低碳情景下的土地利用结构优化的碳减排潜力约为常规低碳政策的 1/3,说明合理配置土地利用结构可以有效促进全球和区域碳循环^[11]。因此,土地作为“山水林田湖草生命共同体”的载体,其数量结构优化及空间配置是解决生态环境与经济发展二者之间矛盾的重要手段,只有数量结构优化与空间模拟配置相结合,才能实现以低碳优化为目标的土地利用格局,早日完成“碳达峰”和“碳中和”目标。

南昌市作为全国首批低碳试点省会城市,随着经济的快速发展和建设用地的快速扩张,土地利用结构发生显著变化,碳排放量增加迅速,城市环境压力明显增大,本文以低碳优化为目标,采用多目标线性规划预测 2025 年南昌市土地利用数量结构,基于优化结果,借助 FLUS 模型对未来土地利用空间布局进行模拟,以期构建“山水林田湖草生命共同体”的低碳城市提供参考依据,因此进行城市低碳优化模拟具有一定的典型性和代表性。

一 研究方法数据来源

(一)研究区概况

南昌市是全国首批低碳试点及唯一邻接三大经济区(长江三角洲、珠江三角洲和海峡西岸经济区)的华东地区省会城市,全境西北高东南低,地形以平原为主,东南地势平坦,毗邻抚州市,西北丘陵起伏,与九江市、上饶市、宜春市相连。截止 2017 年,全市总面积 743 218.34 hm^2 ,城镇人口 294.55 万人,城镇化率为 73.32%,相比于 2000 年,全市 GDP 增加了 10 倍,达到了 4 819.76 亿元,第一二三产业比重由 10.9:45.8:43.3 调整为 3.8:52.2:44.0。其中 2017 年工业比值达到 38.00%,比去年略有下降,但能源生产和消费分别增加了 5.24% 和 4.22%,能源生产和消费弹性系数分别达到 0.58 和 0.47,与 2000 年相比,原煤增加了 $1\,582.73 \times 10^4 \text{ t}$,洗精煤增加了 $7\,715.81 \times 10^4 \text{ t}$,其他洗煤增加了 $49.52 \times 10^4 \text{ t}$,焦炭增加了 $95.84 \times 10^4 \text{ t}$,汽油增加了 $0.89 \times 10^4 \text{ t}$,柴油增加了 $1.93 \times 10^4 \text{ t}$,煤油减少了 $0.14 \times 10^4 \text{ t}$,燃料油减少了 $2.57 \times 10^4 \text{ t}$,能源消费量显著增加,城市碳排放压力日益严峻。

(二)数据来源

土地利用原始数据来源于 2000 年、2005 年、2010 年和 2017 年 Landsat TM/ETM+遥感影像,空间分辨率为 30 $\text{m} \times 30 \text{ m}$,在 ENVI 4.3 软件中通过辐射校正、几何校正、图像配准和人工解译等处理后得到四个年份的土地利用现状图。基于研究需要,根据中科院土地利用遥感监测分类系统^[12],将土地利用类型分为 6 类,即耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地,并通过将外业调查和随机抽取动态图斑进行重复判读分析相结合的方法评价分类精度,通过分类误差及 Kappa 系数检验,总体精度均达到 85% 以上,达到研究所需数据精度要求。本文将解译得到的 2000 年、2017 年土地利用数据作为 FLUS 模型的基期、验证及预测辅助数据。

社会经济数据主要来源于《江西省统计年鉴(2001—2018 年)》《南昌市统计年鉴(2001—2018 年)》和南昌市国民经济与社会发展统计公报。

文中 DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),GDP 空间千米网格分布数据、人口空间千米网格矢量数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),各级道路距离矢量数据源于 1:25 万全国基础地理数据库,水域及居民点距离矢量数据从土地利用数据提取。

二 研究方法

(一)碳排放量计算

鉴于不同地类碳排放存在的差异性,本文将碳排放量分为以建设用地为主的间接碳排放量计算和除建设用地外的直接碳排放量计算,具体计算如下。

1. 间接碳排放量计算

本文建设用地碳排放量主要根据各种能源消费量来核算,根据数据的可获取性,本文从南昌市及江西省统计年鉴选取了煤、洗精煤、其他洗煤、焦炭、汽油、煤油、柴油、燃料油等八种能源。计算公式中所需折标准煤系数来自《中国能源统计年鉴》(2016),碳排放系数根据《IPCC 国家温室气体清单指南》的碳含量缺省值转换而来(表 1)。计算公式为^[18]:

$$E_t = \sum_{i=1}^8 E_{ti} = \sum_{i=1}^8 (E_{ni} \times \theta_i \times f_i) \quad (1)$$

式中: E_t 为建设用地碳排放总量; E_{ti} 为第 i 类能源产生的碳排放量; E_{ni} 为不同化石能源年消耗量; θ_i 为不同能源的折算标准煤系数; f_i 为不同能源的碳排放系数。

表 1 南昌市能源碳排放系数

能源名称	折标准煤系数 /kgC•kg	碳排放系数 /tC•t
原煤	0.7143	0.7559
洗精煤	0.9000	0.7559
其他洗煤	0.2857	0.7559
焦炭	0.9714	0.8550
汽油	1.4174	0.5538
煤油	1.4174	0.5714
柴油	1.4571	0.5921
燃料油	1.4286	0.6185

2. 直接碳排放计算

参考已有研究成果(表 2),非建设用地计算公式如下:

$$E_k = \sum e_i = \sum T_i \times \delta_i \quad (2)$$

式中: E_k 表示非建设用地碳排放量; i 表示土地类型; e_i 表示第 i 种地类产生的碳排放量; T_i 表示第 i 种地类面积; δ_i 表示第 i 种地类碳排放(吸收)系数。具体非建设用地碳排放系数来源如表 2。

表 2 南昌市非建设用地碳排放系数

地类	碳排放系数 /kgC•m ² •a	参考来源
耕地	0.0422	孙赫等 ^[13] ;孙贤斌 ^[16]
林地	-0.0644	方精云等 ^[17] ;王刚等 ^[14] ;石洪昕等 ^[15]
草地	-0.0021	孙赫等 ^[13] ;石洪昕等 ^[15]
水域	-0.0253	孙赫等 ^[13] ;石洪昕等 ^[15]
未利用土地	0.0005	孙赫等 ^[13] ;石洪昕等 ^[15]

(二) 土地利用结构优化模型

灰色多目标线性规划在提供较大信息量的基础上, 给予决策者更多选择空间, 本身具备多目标性和动态性, 因此可以最大程度保证土地利用结构优化方案的科学性和可行性。由于土地利用自身是一个关系复杂多变的系统, 借助多目标线性规划模型可以较大程度规避土地利用变化中的不利因素, 使优化结果符合经济社会的可持续发展, 结果的可信度较高, 其预测过程如下(表 3)。

1. 设置模型变量

本文根据自身数据及研究需要使用灰色多目标线性规划法对模拟年南昌市有限的土地资源进行数量上的优化配置, 根据地类将决策变量划分成耕地(X_1)、林地(X_2)、草地(X_3)、水域(X_4)、建设用地(X_5)和未利用地(X_6)6 种。

2. 构建目标函数

土地利用低碳化不能盲目牺牲经济、社会效益, 而是综合考虑各方因素, 以实现经济效益、社会效益和生态效益的有机统一为目标, 本文在分析研究区土地利用状况的基础上, 结合南昌市社会经济发展情况, 分别构建了碳排放、经济和生态三种目标函数。

(1) 碳排放目标函数。

$$\min F_1(x) = \sum_{i=1}^6 E_i X_i \quad (3)$$

式中: $F_1(x)$ 为碳排放函数; X_i 为第 i 类决策变量; E_i 为第 i 类土地类型的碳排放系数。非建设用地碳排放系数借鉴已有的研究成果; 根据 2000 年、2005 年、2010 年和 2017 年的建设用地碳排放量, 构建线性回归模型: $y = 0.2458x - 431.73$, 确定 2025 年南昌市建设用地碳排放系数, 为 66.015 kgC/hm^2 。由此可得到碳排放目标函数:

$$F_1(x) = 0.0422X_1 - 0.0644X_2 - 0.0021X_3 - 0.0253X_4 + 66.0510X_5 + 0.0005X_6 \quad (4)$$

(2) 经济效益目标函数。

根据南昌市 2000—2017 年各地类经济产出, 确定各用地类型的相对权益系数, 其中非建设用地经济产出主要考虑农、林、牧、渔等产业产值; 建设用地则根据第二、三产业核算; 由于未利用地几乎不存在任何经济活动, 故将其经济产出效益系数视作 0; 参考 2000—2017 年各地类经济产值, 同时考虑实际情况, 适当提高建设用地的相对权益系数。由此得到 6 种地类的权益系数 P_i :

$$P_i = (0.0088, 0.0048, 0.0045, 0.0074, 0.9746, 0)$$

本文在各土地利用类型权益系数的基础上, 结合 2000—2017 年研究区国内生产总值, 利用 GM(1, 1) 灰色模型预测 2025 年研究区经济产值为 276.8 亿元。然后, 按照相对权益系数计算出各地类经济产出及单位经济产出, 其中未利用地的系数为 0。

$$e_i = (245678.06, 437033.92, 5944435.37, 619165.30, 96773390.62, 0)$$

根据各地类经济产出, 最终可得到经济效益目标函数:

$$\max F_2(x) = 245678.06X_1 + 437033.92X_2 + 5944435.37X_3 + 619165.30X_4 + 96773390.62X_5 \quad (5)$$

表 3 不同土地利用类型生态服务价值

耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
6114.3	19334.0	6406.5	46076.4	- 42559.0	371.4

注:表中数据单位为元/hm²。

(3) 土地利用生态效益目标函数。

由于生态效益难以量化,本文借助生态系统服务价值来构建生态效益目标函数。借鉴已有成果^[19-20]。确定各地类生态系统服务价值。

$$\max F_3(x) = 6114.3X_1 + 19334.0X_2 + 6406.5X_3 + 46076.4X_4 - 42559.0X_5 + 371.4X_6 \quad (6)$$

3. 约束条件

根据南昌市的自然和社会经济发展实际状况,结合当地发展规划要求,建立以下约束条件:

(1) 土地总面积约束: $X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 = 720398.29$ 。

(2) 耕地面积约束:在南昌市土地利用总体规划(2006—2020)中,规定南昌市耕地最低保有量为 225 054 hm²,为了维护当地生态与粮食安全,设置耕地面积约束条件为: $X_1 \geq 225054$ 。

(3) 生态环境保护约束:根据南昌市土地利用总体规划(2006—2020)要求,2020 年林地和草地面积分别为 131 504 hm²、11 078 hm²,受各种因素影响到 2025 年应略低于此值,林地约束面积为: $110775 \leq X_2 \leq 131504$; 草地约束面积: $7635 \leq X_3 \leq 11078$ 。

(4) 水域面积约束:研究期间,水域面积以一定幅度减少,一些水域转变为耕地及其他用地,2017 年南昌市水域面积为 116 933.93 hm²。因此,水域面积的约束条件设置为: $119297 \leq X_4 \leq 155128$ 。

(5) 建设用地约束:根据历年增长幅度,在 2017 年基础上,预测到 2025 年建设用地的面积将会增加,2017 年南昌市建设用地的现状面积为 72 765.17 hm²,建设用地面积的约束条件设置为 $100526 \leq X_5 \leq 120165$ 。

(6) 未利用地约束:由于经济建设占用和土地开发整理复垦等的需要,2025 年未利用地面积将会大大减少,根据未来其他土地利用类型数量需求,并考虑实际情况, $17669 \leq X_6 \leq 22600$ 。

(三) FLUS 模型

FLUS 模型的应用建立在系统动力学模型和元胞自动机模型的基础上,有机结合人工神经网络算法和轮盘赌选择机制的优点,在提高土地利用空间模拟精度的条件下,可以充分有效处理经济、社会和自然等多种驱动因素及不同地类之间转换的限制需求^[20]。其模拟过程如下:

1. 土地利用变化驱动因子及限制区选择与确定

由于自然因素的长期稳定性,社会、经济因素在城市快速发展的过程中,具有明显的复杂性,逐渐演变成地类变化的主导因素^[22]。根据南昌市的实际情况及相关数据的可获取性,借鉴国内外已有的研究成果,本文选取了自然、社会和经济因子三大类 11 种驱动因子(表 4)。其中,

选择地形条件作为自然因子, 包括高程、坡度和坡向, 坡度和坡向通过 ArcGIS10.2 从高程数据中获取; 选取通过 ArcGIS10.2 距离分析工具提取的与高速公路距离、与一般公路距离、与铁路距离、与居民点距离、与水域距离 5 种可达性因子作为社会因子; 经济因子选择 GDP 和人口密度。

表 4 土地利用变化驱动因子

驱动因子类型	驱动因子	处理方法	数据来源	单位
自然因子	高程	Albers 投影	DEM 影像图	m
	坡度	Slope 工具		角度
	坡向	Aspect 工具		方向
社会因子	与高速公路距离	EucDistance 工具	交通路线矢量图	m
	与一般公路距离			m
	与铁路距离			m
	与居民点距离		土地利用分类数据中提取城镇居民点	m
	与水域距离		土地利用分类数据中提取水域	m
经济因子	GDP	Resample 工具	GDP 空间分布千米网格数据重采样	万元 /km ²
	人口密度		人口空间分布千米网格数据重采样	人 /km ²

2. 各用地类型分布的适宜性概率分布

应用 FLUS 模型对南昌市 2025 年土地利用现状进行模拟时, 首先将 2000 年土地利用现状数据作为初始年数据, 并对本文选取的 11 个驱动因子进行归一化处理, 然后在训练样本中经过反复多次均匀采样试验, 最终提取栅格数据 15% 的像元作为训练样本, 接着利用 BP—ANN 模型得到每个像元所代表地类型适宜性概率, 最终得到不同地类分布的适宜性图集。为了方便进行直观判断分析不同地类适宜性概率, 将得到的图集在 ArcGIS10.2 中按照地类在单一波段下分别显示出来, 图中颜色越深表示该地类在此分布的适宜性概率越高, 反之越低。

由图 1 可知, 耕地的高适宜性区域主要集中分布于中部地势平坦和水源丰富的平原地区及西北和东南的山地丘陵的坡下, 整体面积较大, 与南昌市良好的自然资源禀赋条件密切相关; 林地的高适宜性区域主要集中分布于西北角丘陵区西山主脉梅岭两侧, 主要区域受到人类生产活动干预较少; 草地的高适宜性区域主要分布于中部偏西及东南丘陵区, 与林地在中部有部分重合, 这些区域与自然条件限制人类活动有关; 水域的高适宜性区域主要分布于鄱阳湖水系及有水田出现的周围区域; 建设用地高适宜性区域南部偏东的基础设施完善、地势平坦的区域, 未来受城市发展相关规划的限制, 呈现集中分布的趋势; 南昌市未利用地受到城市发展需求影响, 面积不断减少, 范围持续缩小, 适宜性概率较高的区域与原有区域大体一致, 主要分布于东北角区域的鄱阳湖周边区域。整体上看, 不同土地利用类型的适宜性概率分布情况, 高适宜性概率分布区域由于受到自然条件的严格限制, 大致区域与原有区域吻合, 且随着分布的扩散, 其适宜性概率也随之下降。

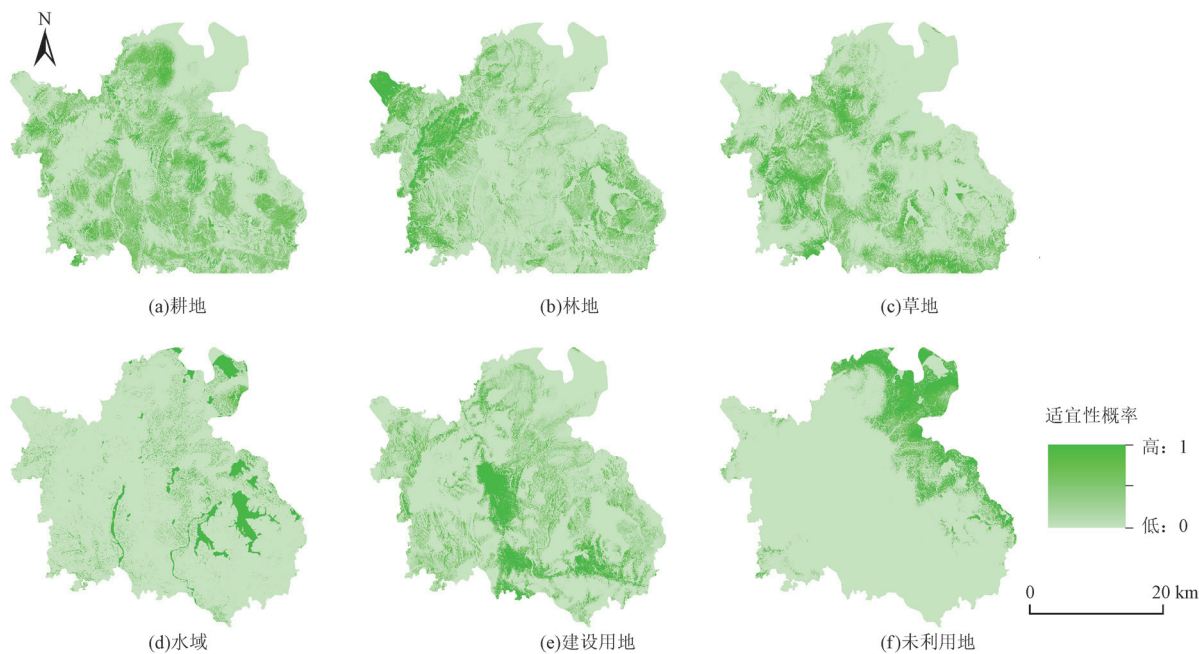


图 1 各用地类型适宜性概率分布

3. 成本矩阵与限制区确定

成本矩阵表示各地类间的转换规则，是各地类之间是否可以相互转换的依据。当某种地类不允许转变为其他类型用地时，矩阵对应值为 0；否则，矩阵对应值为 1。结合南昌市地类变化的实际情况，随着科学技术的不断发展和经济水平的不断提高，任何地类均可转换为建设用地，然而建设用地转换为其他地类难度和成本较高，因此本文设定建设用地不允许转变为其他地类；非建设用地之间能否相互转变无法直接判断，因此成本矩阵参数需要根据其限制条件进行设定(表 5)。

表 5 情景模拟成本矩阵

类型	2025 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	1	0	0	0	1	1
林地	0	1	0	0	0	0
草地	0	0	1	0	0	0
水域	0	0	0	1	0	0
建设用地	1	0	0	0	1	1
未利用地	1	0	0	0	1	1

同时设定限制发展区域, 本文对水域进行处理, 设置其为限制扩张区域, 模拟过程中禁止水域与其他地类相互转化。

4. 模型应用与验证

在 FLUS 模型中将 2000 年南昌市土地利用现状数据作为初始年数据, 导入各用地类型的适宜性概率图集和限制性因素, 对模型参数进行设置, 对 2017 年南昌市土地利用现状进行模拟, 并将其结果和 2017 年土地利用现状的真实数据进行比较验证, 验证结果见表 6。

表 6 FLUS 模型验证系数

精度指标	<i>OA</i>	<i>Kappa</i>	<i>FOM</i>
系数值	0.936355	0.901353	0.054192

本文通过 FLUS 模型中的总体精度 (*OA*)、*FOM* 指数及 *Kappa* 指数来验证模型的有效性, *OA* 和 *Kappa* 值通常介于 0 ~ 1 之间, 数值越接近 1, 模型的仿真精度越高^[23]。当 $Kappa \geq 0.75$ 时, 模型的仿真精度较高; 当 *Kappa* 值在 0.50 ~ 0.75 之间时, 模型的仿真精度一般^[24]。本文模拟的总体精度 (*OA*) 高达 0.94, *Kappa* 指数高达 0.90, *FOM* 指数达到了 0.05, *FOM* 指数实践验证表明其结果大多在 0.3 以内^[25]。综合以上 3 个精度系数, 表明 FLUS 模型适用于模拟南昌市未来土地利用变化状况, 且模拟结果比较好。

三 结果与分析

(一) 2000—2017 年土地利用碳排放量变化分析

2000—2017 年南昌市土地利用类型变化显著, 具有明显的“一升五降”特征, 建设用地扩张明显, 其余地类均呈减少趋势(表 7)。研究期间, 建设用地增幅最大; 耕地变化幅度相对较小, 但净减少量最大; 草地和未利用地减幅最大, 分别减少了 1 774.23 hm² 和 4 833.88 hm²; 林地和水域变动较小, 只下降了 5.47% 和 3.65%。土地利用变化重要性指数计算表明, 建设用地指数高达 0.50; 耕地变化幅度较小, 由于基数大, 指数达到了 0.30; 草地和未利用地减幅较大, 基数小, 指数仅为 0.02 和 0.06; 林地和水域指数与下降幅度保持一致, 二者均不大, 仅 0.08 和 0.05。其中耕地和建设用地指数均大于 0.3, 远大于其余地类, 这表明建设用地和耕地是土地利用变化的主要类型。

伴随着南昌市土地利用类型的显著变化, 土地利用净碳排放量总体呈增加趋势(表 8)。研究期间, 碳源增加了 $2\,281.92 \times 10^4$ t, 年均增加 134.23×10^4 t, 碳汇增加了 0.54×10^4 t, 其中建设用地是碳源的最大贡献者, 历年占比都接近 100%; 林地是碳汇的最大贡献者, 历年占比都超过 70%, 水域次之, 草地最小。从各时间段可以看出, 年均碳排放增加量呈减少趋势, 由第一阶段(2000—2005 年)的 277.67×10^4 t 减少为第三阶段(2010—2017 年)的 25.01×10^4 t, 主要受

益于城市产业结构调整,其中第一、二、三产业比重由 2005 年 5.5:56.7:37.8 调整为 2010 年的 4.3:54.5:41.2,2017 年进一步优化为 3.5:49:47.5,朝着信息化、低碳化方向发展,以致增加量有所减少。

表 7 2000—2017 年南昌市土地利用变化

类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	减少面积
耕地	0	794.16	75.25	6433.38	35055.87	461.26	42819.91
林地	4061.35	0	221.69	199.02	5005.50	9.21	9496.77
草地	648.08	1243.73	0	125.95	356.55	0.00	2374.31
水域	8608.18	399.88	12.50	0	4067.29	2512.23	15600.08
建设用地	1526.20	21.88	0.88	1175.51	0	41.16	2765.62
未利用地	633.77	0.27	24.31	4142.99	142.13	0	4943.46
增加面积	15477.58	2459.91	334.62	12076.85	44627.35	3023.85	78000.16
净变化	— 27342.33	— 7036.86	— 2039.69	— 3523.23	41861.72	— 1919.61	0
变化幅度 /%	6.27	5.47	19.17	3.65	138.87	14.22	/
地类变化重要性指数	0.30	0.08	0.02	0.05	0.50	0.06	/

注:表中面积数据单位均为 hm^2 ,“/”代表无数据。

表 8 2000—2017 年南昌市土地利用碳排放量

碳排放量		2000 年	2005 年	2010 年	2017 年
碳源	耕地	17.04	16.37	16.51	15.98
	未利用土地	0.02	0.02	0.02	0.01
	建设用地	1792.85	3181.68	3899.68	4075.14
	总计	1809.91	3198.07	3916.21	4091.13
碳汇	林地	— 7.82	— 7.73	— 7.63	— 7.39
	草地	— 0.02	— 0.02	— 0.02	— 0.02
	水域	— 3.07	— 2.99	— 2.88	— 2.96
	总计	— 10.91	— 10.74	— 10.52	— 10.37
净碳排放量		1799.00	3187.33	3905.68	4080.77

注:表中数据单位为 10^4t 。

(二)2025 年低碳土地利用结构预测

通过灰色多目标线性规划法,对南昌市土地利用数量结构进行预测,借助 Lingo11.0 软件求解结果如表 9 所示。与 2017 年相比,2025 年各地类结构更为均衡,其中耕地和未利用地分别减少了 $93\ 708.71\ \text{hm}^2$ 和 $11\ 465.74\ \text{hm}^2$,林地、草地和水域均有不同程度增加,建设用地由于经济社会的快速发展,需求量较大,变化幅度相对较大,整体增加了 65%。整体上看,优化后的土地利用结构,由于充分考虑经济、生态和社会各方面因素,结构更加均衡,碳汇较 2017 年增加了 $2.04\times 10^4\ \text{t}$,充分兼顾了多方利益,有助于协调经济发展和环境保护二者之间的矛盾,促进城市低碳发展,为城市健康发展提供了可行性参考。

表 9 2025 年南昌市土地利用数量及碳排放量结果

类型	2017 年		2025 年		面积变化率	碳排放量变化 /10 ⁴ t
	面积 /hm ²	碳排放量 /10 ⁴ t	面积 /hm ²	碳排放量 /10 ⁴ t		
耕地	378563.01	15.98	284854.3	12.02	- 0.25	- 3.96
林地	114805.36	- 7.39	131504	- 8.47	0.15	1.08
草地	7479.27	- 0.02	11078	- 0.02	0.48	0
水域	116933.93	- 2.96	155128	- 3.92	0.33	0.96
建设用地	72765.17	4075.14	120165	7908.34	0.65	3023.20
未利用地	29164.74	0.01	17699	0.01	- 0.39	0

(三)2025 年低碳土地利用优化模拟

基于灰色线性规划模型预测结果,借助 FLUS 模型,得到模拟年土地利用现状分布图(图 2)。2025 年土地利用结构稳定,有效杜绝了 2000—2017 年期间某种地类出现的持续减少或增加的恶性循环结果,考虑到经济社会的发展需要,建设用地的需求会持续增加,因此模拟年建设用地面积较大,但更为集中,同时碳汇主要贡献者的林地、草地和水域面积有不同程度增加,生态环境和经济发展二者之间的矛盾得到调和。

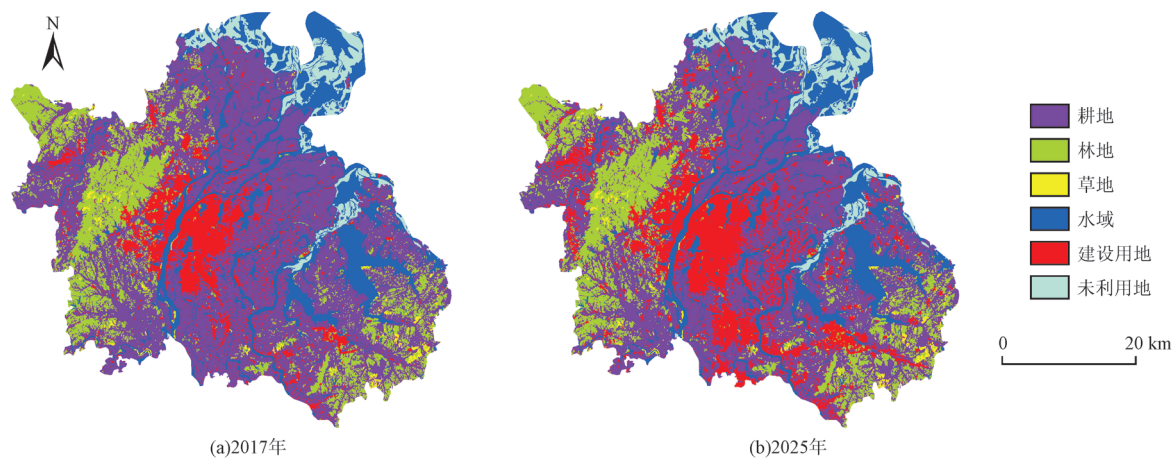


图 2 2017 年南昌市土地利用现状及 2025 年预测模拟情况

林地面积的持续增加,为涵养水源、调节气候及防治水土流失起到不可忽视的作用,进一步优化了生态环境质量,减轻了城市碳排放压力;水域不断增加,水资源得到进一步保护,为中国第一大淡水湖鄱阳湖生态湿地提供生态支撑及可持续发展提供保障;建设用地的集中发展,避免了城市无序扩张带来的资源不合理利用,进一步优化了城市结构布局;草地少量增加,主要分布在山地丘陵的缓坡地带,进一步保护了建设用地向耕地和林地的扩张。

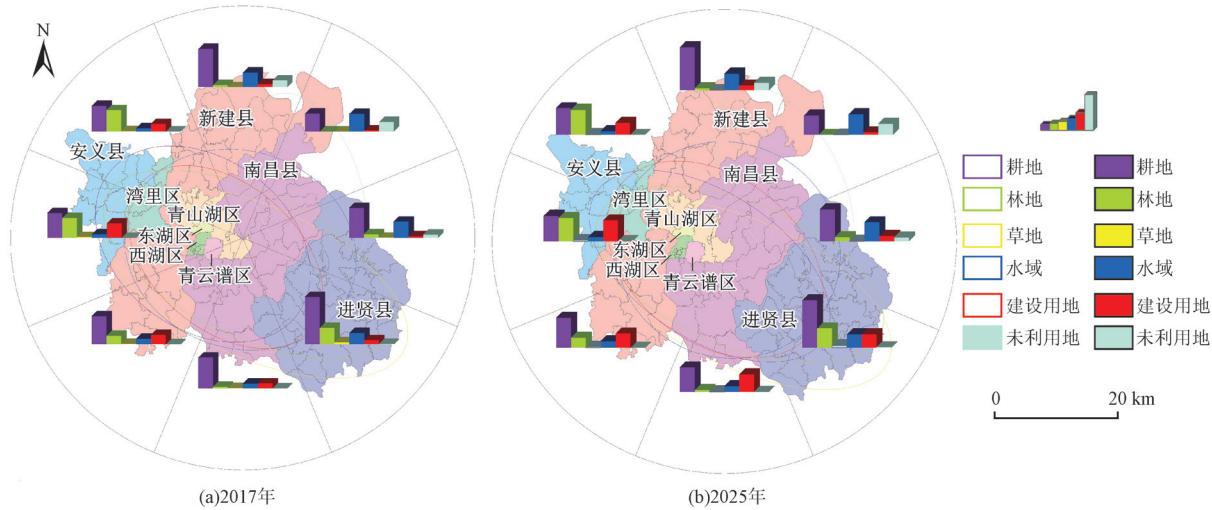


图 3 2017 年和 2025 年南昌市土地利用标准差椭圆及各方位面积统计

从标准差椭圆看(表 10),2017—2025 年不同地类主趋势方向差异明显,整体呈现西北—东南趋势。其中,耕地椭圆范围减少,中心向东南转移,扁率增加,方向性明显,长轴和短轴均呈缩小趋势,表明东西收缩大于南北,且主趋势方向分布的离散程度在减小,存在整体向东部集中的趋势,方向角由 126.45 减少为 121.03,表明西北—东南方向分布格局弱化;林地椭圆范围减少,中心向东转移,扁率减小,方向性不明显,方向角由 114.70 减少为 113.37,西北—东南方向分布格局弱化;草地椭圆范围减少,中心向东南转移,扁率减小,方向性不明显,方向角由 114.25 增加为 114.65,西北—东南方向分布格局强化;水域椭圆范围增加,中心向东北转移,扁率减小明显,方向性不明显,方向角由 109.82 增加为 135.93,西北—东南方向分布格局强化;建设用地椭圆范围增加,中心总体向东北转移,扁率减小,方向性不明显,方向角由 130.17 减小为 128.65,西北—东南方向分布格局弱化;未利用地椭圆范围增加,中心向西北转移,扁率减小,方向性不明显,方向角由 163.69 减小为 147.16,西北—东南方向分布格局弱化。

表 10 土地利用标准差椭圆参数

类型	面积 /km ²		扁率 /km		方向角		中心点坐标	
	2017 年	2025 年	2017 年	2025 年	2017 年	2025 年	2017 年	2025 年
耕地	342389.43	327163.95	11.02	18.10	126.45	121.03	105.24° E, 30.78° N	106.05° E, 30.72° N
林地	378359.30	364568.38	27.86	25.15	114.70	113.37	106.80° E, 30.71° N	106.91° E, 30.71° N
草地	387527.42	363321.20	30.63	28.04	114.25	114.50	106.77° E, 30.65° N	107.14° E, 30.63° N
水域	381483.70	396980.77	5.92	0.86	109.82	135.93	106.39° E, 30.76° N	106.60° E, 30.79° N
建设用地	275110.53	351081.94	12.91	10.95	130.17	128.65	105.91° E, 30.74° N	106.25° E, 30.78° N
未利用地	152178.82	187790.94	14.20	9.03	163.69	147.16	108.47° E, 30.96° N	108.42° E, 30.99° N

四 结论与讨论

在分析南昌市 2000—2017 年土地利用现状及碳排放量变化的基础上,借助灰色多目标线性规划模型预测 2025 年优化后的土地利用结构,并通过 FLUS 模型模拟目标年土地利用空间分布格局,具体结论如下:

研究期间,南昌市土地利用变化具有明显的“一升五降”特征,建设用地扩张显著,其余地类均减少,建设用地增幅最大,草地及未利用地减幅较大,其余地类变化较小,其中建设用地和耕地是土地利用变化的主要类型;土地利用净碳排放量显著增加,碳源大于碳汇,导致城市生态环境压力增大,得益于产业结构调整,年均碳排放增加量有所减少,生态环境压力得到一定程度缓解。

2025 年各地类结构更为均衡,有效杜绝了某种地类出现的持续减少或增加的恶性循环结果。其中耕地和未利用地分别减少了 $93\,708.71\text{ hm}^2$ 和 $11\,465.74\text{ hm}^2$,林地、草地和水域均有不同程度增加,变化幅度相对较大,整体增加了 65%。整体上看,优化后的土地利用结构,碳汇较 2017 年增加了 $2.04\times 10^4\text{ t}$,充分兼顾了多方利益,有助于协调经济发展和环境保护二者之间的矛盾。

2025 年土地利用结构稳定,虽然建设用地面积较大,但更为集中,林地、草地和水域面积有不同程度增加。在不同方位上,模拟年各地类数量之间的比例得到显著优化,其中耕地在北、东北和东的面积减少较大;林地在东南增加较多;建设用地主要分布在东南,进一步减轻了其他方位的生态压力;水域、草地和未利用地整体变化不大。从标准差椭圆看,2017—2025 年不同地类主趋势方向差异明显,整体呈现西北—东南趋势,其中,耕地、林地、草地的椭圆面积减小,耕地椭圆扁率增大,草地和水域椭圆方向角变化为正,耕地的中心点坐标整体向东南移动,林地整体向东移动,草地整体向东南移动,水域和建设用地整体向东北移动,未利用地整体向西北移动。

研究得出的结果与土地利用已有预测模拟研究结果,基本保持一致,具有一定参考价值。土地利用变化驱动因子作为模拟的基础,其科学性和合理性直接影响模拟的精度,本文选择了 11 种驱动因子,未来研究需要考虑更多驱动因子,如政府决策、农户意愿等主观因素,使结果更具科学性;其次模型参数选择需要进一步优化,符合区域特征。

基于优化模拟的 2025 年土地利用结构,一定程度上协调了经济发展和生态保护之间的矛盾,但在未来的发展中仍需注意建设用地的集约节约利用,保证耕地数量与质量,注重林地、草地的保护,在构建“山水林田湖草生命共同体”过程中实现“碳达峰”和“碳中和”的目标,这就对土地利用模拟提出了更高要求,未来需要更加细致的深入研究,达到经济社会可持续发展的总体目标。

参考文献:

- [1] Luuk Fleskens, Filomena Duarte, Irmgard Eicher. A conceptual framework for the assessment of multiple

- functions of agro-ecosystems: A case study of Trás-os-Montes olive groves-ScienceDirect[J]. Journal of Rural Studies, 2009, 25(1): 141-155.
- [2] 曲福田, 卢娜, 冯淑怡. 土地利用变化对碳排放的影响 [J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(10): 76-83.
- [3] 彭文甫, 周介铭, 徐新良, 等. 基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局 [J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7244-7259.
- [4] 邓吉祥, 刘晓, 王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 189-200.
- [5] 龙远, 李萍, 唐月亮, 等. 耕地保护情景下长浏平丘陵区土地利用变化模拟——FLUS 模型的应用 [J]. 江西农业学报, 2020, 32(5): 126-134.
- [6] Zhou Rubo, Lin Meizhen, Gong Jianzhou, et al. Spatiotemporal heterogeneity and influencing mechanism of ecosystem services in the Pearl River Delta from the perspective of LUCC[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(5): 193-207.
- [7] 刘慧灵, 伍世代, 韦素琼, 等. 基于低碳经济导向的土地利用结构优化研究——以福建省福州市为例 [J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 202-208.
- [8] 单录铨, 王海军, 张彬, 等. 顾及土地生态安全的环鄱阳湖城市群土地利用情景模拟 [J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 543-556.
- [9] 苏维词, 易武英. 基于灰色模型的贵阳市土地利用 / 覆被变化的驱动力分析 [J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 256-259.
- [10] 赵清旭, 秦立达. 绿色低碳导向的土地利用结构优化配置研究分析 [J]. 西部资源, 2020, (1): 138-140.
- [11] 董祚继. 低碳概念下的国土规划 [J]. 城市发展研究, 2010, 17(7): 1-5.
- [12] 李玉霞, 李丽, 郑泽忠. CBERS—02 图像在土地利用 / 覆盖动态监测中的应用 [J]. 四川师范大学学报: 自然科学版, 2006, 29(5): 627-630.
- [13] 孙赫, 梁红梅, 常学礼, 等. 中国土地利用碳排放及其空间关联 [J]. 经济地理, 2015, 35(3): 154-162.
- [14] 王刚, 张华兵, 薛菲, 等. 成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1170-1182.
- [15] 石洪昕, 穆兴民, 张应龙, 等. 四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究 [J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 101-106.
- [16] 孙贤斌. 安徽省会经济圈土地利用变化的碳排放效益 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(3): 394-401.
- [17] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804-812.
- [18] 范建双, 虞晓芬, 周琳. 南京市土地利用结构碳排放效率增长及其空间相关性 [J]. 地理研究, 2018, 37(11): 2177-2192.
- [19] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法 [J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [20] Costanza R, Arge, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(15): 253-260.

- [21] 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.
- [22] 刘晓娜,李红.城乡结合部基本农田划定与保护研究[J].农业展望,2016,12(3):33-39.
- [23] 彭云飞.基于 FLUS 模型的大都市区土地利用优化模拟——以深圳市为例[J].山东国土资源,2019,35(8):70-74.
- [24] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, etc. 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.
- [25] 吴欣昕,刘小平,梁迅,等.FLUS—UGB 多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J].地球信息科学学报,2018,20(4):532-542.

版权申明

为实现数字化转型升级,使本刊文献资源达到广泛传播和深度开发利用,由重庆维普资讯有限公司在“维普网”平台开展数字化出版的有关事宜,作者如有异议,请在来稿时注明,本刊将做适当处理。

《国土资源科技管理》编辑部