

基于低碳导向的南昌市土地利用模拟与优化调控研究

陈嘉诚, 罗志军, 罗媛

(江西农业大学 国土资源与环境学院, 江西 南昌 330045)

摘要: [目的] 对不同低碳情景下土地利用变化进行模拟, 对比多情景下的碳储量和碳排放差异, 为江西省南昌市的低碳发展提供相关建议。[方法] 基于碳储量最大情景和碳排放最小情景对 2030 年土地利用结构进行优化, 并运用 FLUS 模型模拟南昌市多情景下土地利用的空间分布特征。[结果] ① 根据数量结构优化结果, 碳储量最大和碳排放最小情景下土地利用碳排放均小于自然发展情景, 碳储量均大于自然发展情景。综合来看, 碳汇最大化情景下土地利用数量结构优化效果更优。② 根据空间结构模拟结果, 低碳情景与自然发展情景相比建设用地在空间分布上相对集中, 并且碳排放减少区域和碳储量增加区域主要分布于中部和南部区域。[结论] 为了早日实现南昌市碳达峰和碳中和的目标, 建议优化土地利用结构, 落实生态保护和耕地保护政策, 控制建设用地过度扩张, 加强对重点区域的调控。

关键词: 低碳; 土地利用; FLUS 模型; 南昌市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0365-09

中图分类号: F301.2, X171.1

文献参数: 陈嘉诚, 罗志军, 罗媛. 基于低碳导向的南昌市土地利用模拟与优化调控研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 365-373. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.042; Chen Jiacheng, Luo Zhijun, Luo Yuan. Research on land use simulation and optimization regulation in Nanchang City based on low-carbon orientation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 365-373.

Research on Land Use Simulation and Optimization Regulation in Nanchang City Based on Low-carbon Orientation

Chen Jiacheng, Luo Zhijun, Luo Yuan

(College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

Abstract: [Objective] The changes in land use under different low-carbon scenarios were simulated, and the differences in carbon storage and carbon emissions under multiple scenarios were compared in order to provide relevant suggestions for the low-carbon development of Nanchang City, Jiangxi Province. [Methods] The land use structure in 2030 was optimized based on the maximum carbon storage scenario and the minimum carbon emission scenario. The FLUS model was used to simulate the spatial distribution characteristics of land use in Nanchang City under multiple scenarios. [Results] ① According to the optimization results of the quantity structure, the carbon emissions of land use under the maximum carbon storage and minimum carbon emission scenarios were smaller than under the natural development scenario, and carbon storage was greater than under the natural development scenario. Overall, the effect of quantitative structure optimization of land use under the scenario of maximum carbon sink was better. ② According to the spatial structure simulation results, construction land under the low-carbon scenario was relatively concentrated in spatial distribution compared with the natural development scenario. The areas of carbon emission reduction and carbon storage increase were mainly located in the central and southern regions. [Conclusion] It is suggested to optimize land use structure, implement ecological protection and cultivate land protection policies, limit excessive expansion of construction land, and strengthen the regulation of key areas, so as to achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality of Nanchang City as soon as possible.

Keywords: low carbon; land use; FLUS model; Nanchang City

收稿日期: 2023-03-22

修回日期: 2023-06-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于博弈的城镇扩张与生态网络保护时空耦合与优化管控研究”(41961042); 教育部人文社会科学研究规划资助项目(19YJAZH061); 南昌市经济社会发展重大招标课题(ZDSK202206)

第一作者: 陈嘉诚(1999—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士研究生, 研究方向为土地管理。Email: cjc15270605329@163.com。

通信作者: 罗志军(1976—), 男(汉族), 江西省新余市人, 博士, 教授, 主要从事土地管理和 3S 应用方面研究。Email: luozj10@163.com。

随着人类社会和经济活动消耗大量资源,导致温室气体排放迅速增长,由此产生的气候变暖问题已成为各国科学家和政府高度关注的全球性环境问题之一^[1-2]。在此背景下,2020 年 9 月 22 日中国国家领导人在第 75 届联合国大会上承诺,“中国将提高国家自主贡献度,采取更加有力的政策和措施,力争于 2030 年前达到碳峰值,2060 年前达到碳中和”^[3]。为确保如期实现“双碳”目标,政府在近几年发布了包括《2030 年前碳达峰行动方案》在内的多项二氧化碳减排政策,通过对相关政策的梳理,中国实现碳中和的路径集中于产业结构和能源结构调整优化。然而众多研究成果表明中国陆地生态系统存在巨大碳汇,土地利用格局的变化对于陆地生态系统的碳循环有着举足轻重的作用^[4-5]。因此,优化土地利用结构不仅能促进土地资源的合理利用,还能有效促进区域碳减排^[6-7]。

对于二氧化碳的排放量进行准确的测算,是进行区域碳排放相关研究的基础,从目前研究成果来看,土地利用碳排放测算方法可大致分为模型模拟法、样地清查法、遥感估算法、物料平衡法、排放系数法、实测法和因素分解法^[8]。样地清查法是通过野外实地抽样的方式测算特定区域内的二氧化碳排放量,适用于微观尺度,测量数据较为准确^[9]。排放系数法基于 IPCC 国家温室气体清单指南和温室气体议定书进行的温室气体清单计算^[10-11],由于计算方法较为成熟、可操作性强的优点被广泛应用。本研究中对耕地、林地、草地、水域和未利用地的碳排放计算参考相关文献中实测数据,对于建设用地碳排放采用 IPCC 温室气体清单核算。土地利用模拟研究主要集中于数量预测和空间模拟两方面,现阶段常见的土地利用数量结构预测模型有 Markov 模型、灰色预测模型、多目标线性模型、Logistic 模型、SD 模型等,土地利用空间结构模拟模型有 CA 模型、SLEUTH 模型、CLUE-S 模型、ABM 模型、FLUS 模型等^[12]。经过 30 a 多的发展,土地利用模拟已经逐渐从数量预测发展到空间格局模拟,从单一模型向多种模型耦合^[13-14]。相较于其他模型,FLUS 模型基于 ANN,SD 模型和 CA 模型,并引入自适应惯性系数和轮盘赌竞争机制确定用地类型,模拟精度较高,在此基础上形成具有自主知识产权和独立操作系统的地理模拟优化平台,且近年来在土地利用模拟方面得到广泛应用^[15-17]。

南昌市是中国首批低碳试点城市,为推进区域绿色低碳高质量发展推行了《南昌市低碳发展促进条例(2016 年)》《南昌市“十四五”应对气候变化规划(2021 年)》等政策。但是根据中国碳核算数据库

(China emission accounts and datasets, CEADs)中相关数据显示,南昌市近年来二氧化碳排放量仍以较高水平增长,这不利于南昌市未来的高质量发展,亟待找到土地利用结构与低碳排放的均衡点。因此,本文以南昌市为例,基于相关土地政策约束通过多元线性规划方法估算南昌市 2030 年碳储量最大和碳排放最小目标下土地利用数量结构,并使用 FLUS 模型进行 2030 年多情景空间结构模拟,分析并对比不同情景下土地利用、碳排放量和碳储量的变化特征和差异,在此基础上提出相关调控建议,以期为南昌市低碳试点工作提供新思路,同时对江西省低碳规划起到示范和引领作用。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

南昌市($115^{\circ}27'—116^{\circ}35'E, 28^{\circ}10'—29^{\circ}11'N$)作为江西省会城市,地处江西省中部偏北,地理位置优越。南昌市下辖 6 区(红谷滩、青山湖、新建、东湖、西湖、青云谱区)3 县(安义县、南昌县、进贤县),总面积 $7\,195\text{ km}^2$ 。南昌市作为环鄱阳湖城市群核心城市和长江中游城市群的中心城市之一,经济快速发展的同时,也出现了建设用地飞地式增长、建设占用耕地以及生态环境破坏等问题。

1.2 数据来源

(1) 土地利用数据。本文从地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)获取分辨率为 30 m 的南昌市 2000, 2010, 2020 年 3 期的 Landsat TM/ETM⁺ 遥感影像,通过 ENVI 5.3 对影像进行几何纠正、图像配准等预处理后,利用目视解译和计算机解译相结合的方法进行影像判读分类,根据《土地利用现状分类》(GB/T 21010-2017)将南昌市土地利用类型分为 6 类:耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地。kappa 系数检验和总体精度均达到 0.90,符合研究所需的精度要求。

(2) 土地利用驱动因子数据。参考已有研究结果^[12,18-19],结合南昌市实际情况与数据的科学性和可获得性,通过地理探测器分析剔除影响程度较小的驱动因子后,最终确定了 11 个驱动因子,包括自然因子(DEM、坡向、坡度、年均气温、距中大型水体的距离)和社会经济因子(距乡镇/城市中心的距离、人口密度、GDP 密度、夜间灯光数据、距城市主干路/高速公路/铁路的距离、距火车站/机场的距离)。DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),坡度和坡向通过 ArcGIS 处理得到;年均气温数据、夜间灯光数据和 GDP 密度数据来源于中国科学院资

源环境数据云平台(<https://www.resdc.cn>);道路交通数据来源于 OSM 开源地图网站(<https://master.apis.dev.openstreetmap.org/>);人口密度来源于 worldPop 数据集(<https://www.worldpop.org/>)。结合研究区域进行地理裁剪、欧氏距离分析、归一化等数据处理,最终输出栅格数据分辨率统一为 30 m × 30 m。

2 研究方法

2.1 土地利用变化驱动机制分析方法

地理探测器是由王劲峰等人开发的用于度量空间分异性并探究其驱动因子的统计学方法,被广泛应用于探究土地利用变化及驱动机制相关研究^[18-19],地理探测器包括分异及因子探测、交互探测、生态探测、风险探测 4 个探测器^[20]。本文用因子探测和交互探测进行驱动机制分析。

因子探测器中,探测驱动因子 X 对因变量 Y 的解释力用 q 值度量,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (1)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2 \quad (2)$$

式中: q 值为驱动因子对土地利用变化的解释力, $q \in [0,1]$, q 值越大,说明该驱动因子对土地利用变化的解释力越强; $h=1 \cdots L$; L 为因子 X 的分层; N_h, N 分别为某一分层和整个区域的样本数; σ_h^2, σ^2 分别为某一分层和整个区域的方差和; SSW 和 SST 分别为层内方差之和(within sum of squares)和全区总方差(total sum of squares)。

交互探测器用于计算两两驱动因子 X 交互作用后对因变量 Y 的解释力是增强还是减弱,交互作用类型分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、因子独立、非线性增强。

地理探测器中的 Y 因变量为数值量, X 自变量为类变量。故本研究利用地理探测器分析土地利用驱动机制时,使用土地利用程度作为因变量 Y ^[21],土地利用变化驱动因子作为自变量 X ,从自然因子、社会经济两方面选取 12 个驱动因子,并对驱动因子连续变量进行离散化^[22]。借助 ArcGIS 10.5 平台,构建 28 749 个 0.5 km × 0.5 km 格网,提取每个格网中心点对应的 X, Y 值,并输入到 GeoDetector 中运算。

2.2 碳储量和碳排放量计算

2.2.1 碳储量计算 在使用 InVEST 模型中的

Carbon 模块对碳储量进行计算时,假设各地类对应一个由地下碳密度、地上碳密度、土壤有机质碳密度和死亡有机质碳密度构成的总碳密度,且一种地类的碳密度是一种常量。计算公式如下:

$$C_{total} = \sum_i^n (C_{i-above} + C_{i-below} + C_{i-dead} + C_{i-soil}) \times S_i \quad (3)$$

式中: C_{total} 为总碳存储量; $C_{i-above}$ 为地类 i 的地上碳密度; $C_{i-below}$ 为地类 i 的地下碳密度; C_{i-soil} 为地类 i 的土壤有机质碳密度; C_{i-dead} 为地类的死亡有机质碳密度; S_i 为地类 i 的面积。

各地类 4 大碳库的碳密度数据来源于国家科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn/>)中 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集^[23]。当数据不全时采用邻近省市实地测量数据和文献整理数据^[9,24-28]。其中耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的碳密度依次为 100.87, 137.64, 114.40, 0.00, 44.04, 61.08 t/hm²。

2.2.2 碳排放量计算 各土地利用碳排放量进行计算包括直接碳排放和间接碳排放,其中耕地、林地、草地、水域、未利用地的碳排放量通过碳排放系数直接计算。本文的碳排放系数通过对相关文献研究结果进行整理后取平均值以减少单一误差。耕地、林地、草地、水域、未利用地的碳排放系数依次为 0.460^[29-32], -0.613^[31,33-34], -0.021^[29-30,35], -0.253^[30-31,36], -0.005^[30-31,36] t/hm²。

建设用地的碳排放量通过其上各类化石能源消耗所产生的碳排放量间接计算,计算公式如下:

$$T_j = \sum_{i=1}^n (E_i \times Z_i \times K_i) \quad (4)$$

式中: T_j 为建设用地碳排放量; E_i 为能源 i 的消耗量,参考相关文献^[32,37-39],在《南昌市统计年鉴 2020》中选取原煤、焦炭、天然气、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、热力、电力等 16 种能源终端消耗量; Z_i 为能源 i 折标准煤系数,来自《中国能源统计年鉴》; K_i 为能源 i 的碳排放系数,根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》中各燃料燃烧的缺省排放因子转换得到,南昌市各种能源标准煤换算系数和碳排放系数见表 1。计算得建设用地碳排放总量后,平均到单位面积建设用地,得南昌市建设用地碳排放系数为 63.55 t/hm²。

2.3 多情景设置

设置自然发展情景作为低碳情景模拟的基础,此情景基于南昌市 2010—2020 年历史土地利用变化特征,不考虑相关政策因素影响,运用 Markov 模型预测 2030 年各地类用地规模需求。

表 1 南昌市各种能源标准煤换算系数和碳排放系数

Table 1 Conversion coefficient and carbon emission coefficient of standard coal for each energy source in Nanchang City					
能源种类	折标准煤系数/ (t·t ⁻¹)	碳排放系数/ [10 ⁴ t·(10 ⁴ t) ⁻¹]	能源种类	折标准煤系数/ (t·t ⁻¹)	碳排放系数/ [10 ⁴ t·(10 ⁴ t) ⁻¹]
原煤	0.714 3	0.755 9	天然气(液态)	1.757 2	0.513 0
洗精煤	0.900 0	0.755 9	汽油	1.471 4	0.553 8
其他洗煤	0.285 7	0.759 9	煤油	1.471 4	0.571 4
焦炭	0.971 4	0.855 0	柴油	1.457 1	0.592 1
焦炉煤气	0.571 4	0.354 8	燃料油	1.428 6	0.618 5
高炉煤气	0.128 6	0.460 2	液化石油气	1.714 3	0.504 2
其他煤气	0.178 6	0.354 8	热力	0.034 1	0.670 0
天然气(气态)	1.100 0	0.448 3	电力	0.122 9	0.272 0

注:热力换算成标准煤单位为 kg/MJ(以标准煤计),电力换算成标准煤单位为 kg/kWh(以标准煤计),焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、天然气(气态)换算成标准煤单位为 kg/m³(以标准煤计)。

此外分别设置 2030 年南昌市碳汇最大化和碳排放最小化的情景。以南昌市 2030 年碳汇最大化和碳排放最小化为目标,建立多元线性回归模型,将耕地(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)作为决策变量,参考《2016—2030 年国家土地规划纲要》(以下简称“纲要”)、《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》(以下简称“规划”)、《南昌市国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》(以下简称“南昌规划”)并综合考虑南昌市的社会经济发展和土地利用状况,对决策变量进行条件约束:①总面积约束。南昌市面积为 718 738.41 hm²,各用地类型面积之和保持不变。②建设用地面积约束。根据“纲要”中对于国土开发强度指标的内容,2015—2020 年建设用地面积年均增长率为 1.07%。2020—2030 年建设用地面积年均增长率为 0.86%。根据南昌市实际情况,过去 5 a 的建设用地面积年均增长率为 2.42%。因此将未来十年建设用地面积增长率限制在 1.95%。③林地面积约束。根据“南昌规划”,2025 年森林覆盖率目标值是基本保持不变,2015—2020 年南昌市的森林覆盖率年均下降 1.61%,以此作为下限。此外在“纲要”中指出全国的森林覆盖率将从由 2020 年的 23%增加到 2030 年 24%以上,理想状态下林地面积年均增长 0.43%,故以此作为上限。④其他地类面积约束。在过去 10 a 来,耕地、草地、未利用地的面积都在不同程度地减少,因此耕地、草地和未利用地面积年均减少率不高于过去 10 a 的减少率。

将碳排放计算模型作为多元线性回归模型在 LINGO15.0 中进行求解。其中,碳汇最大化和碳排放最小化的目标函数为:

$$\begin{aligned} \min(Z) &= 0.46X_1 - 0.613X_2 - 0.021X_3 - \\ &\quad 0.253X_4 + 63.55X_5 - 0.005X_6 \\ \max(Z) &= 100.87X_1 + 137.64X_2 + 114.40X_3 + \\ &\quad 0 \times X_4 + 44.04X_5 + 61.08X_6 \end{aligned} \tag{5}$$

2.4 Markov 模型

Markov 模型具有无后效性和平稳性的特征,即在 $t+1$ 时刻所处状态的分布与在时刻 t 之前所处的状态无关,可用于预测国土空间类型在数量上的变化情况^[40]。本研究运用 Geosos-FLUS 软件中的 Markov chain 模块确定南昌市自然发展情景下各地类面积。Markov 模型公式如下:

$$S_{t+1} = S_t \times P_{ab} \tag{6}$$

式中: S_t, S_{t+1} 分别表示在 $t, t+1$ 时刻下土地利用状态; P_{ab} 表示状态转移概率。

2.5 FLUS 模型

FLUS 模型(future land-use simulation)由刘小平等^[15]于 2017 年提出,已经被广泛应用于城市土地利用变化模拟和城市增长开发边界划定^[17,41]。该模型由基于神经网络的适宜性概率计算(artificial neural network, ANN)和基于自适应惯性竞争机制的元胞自动机模块(cellular automata, CA)构成^[16]。首先通过驱动因子与土地利用现状图中各用地的空间分布对其进行随机采样训练获得各像元的发展概率,其次将邻域影响和自适应惯性系数加入进行综合计算获得各像元的综合转换概率,邻域影响是指各像元之间相互作用的关系,自适应惯性系数是指根据某一时刻各用地类型与预测的用地类型数量的差值调整地类转换的趋势^[42]。总体转换概率表示公式为:

$$CP'_{r,m} = DP_{r,k} \times \Omega_r^t \times IC'_m \tag{7}$$

式中: $CP_{r,m}^t$ 表示像元 r 在时刻 t 由原用地类型转换成 k 用地类型的综合转换概率; $DP_{r,k}$ 表示由采样训练计算得到的像元 r 转换成 k 用地类型的发展概率; Ω_r^t 表示 r 像元在 t 时刻时的邻域影响因子; IC_m 表示 m 用地类型在 t 时刻的自适应惯性系数。

2.5.1 FLUS 模型尺度选择 为选择最合适研究区域的研究尺度,本研究分别基于 30,100,200...1 000 m 的栅格尺度,利用 FLUS 模型中的 ANN 模块训练生成各土地利用类型与驱动因子之间的发生概率,然后借助 SPSS 24 中的 ROC(receiver operating characteristic)曲线分析工具计算不同栅格尺度下各土地利用类型的 AUC(area under curve)值。AUC 值是用来度量分类模型好坏的标准,在相关研究中常用于评估驱动因子对土地利用类型的拟合精度,AUC 值介于 0 至 1.0 之间,值越大,表明拟合性能越好,当 AUC 值

大于 0.7 时,说明所选驱动因子对于土地利用空间格局有较高的解释力^[15,43],结果显示在 30 m 栅格尺度中各土地利用类型除草地外发生概率的 AUC 值均为最高且均大于 0.7,因此 FLUS 模型尺度选择为 30 m 栅格。

2.5.2 FLUS 模型精度验证 以南昌市 2010 年土地利用现状图作为初始图层,选择 $3\times3,5\times5\cdots19\times19$ Moore 共 9 个不同的邻域,模拟南昌市 2020 年土地利用情况(图 1),使用 GeoSOS-FLUS 软件中的精度验证模块随机抽取 10% 的像元进行精度检验,其中在 5×5 Moore 邻域时 kappa 系数为 0.882,总体精度 OA 为 93.5%,均为最高。精度检验结果说明使用 FLUS 模型对南昌市 2020 年的土地利用情况模拟结果良好,可用于模拟南昌市未来土地利用变化的研究。

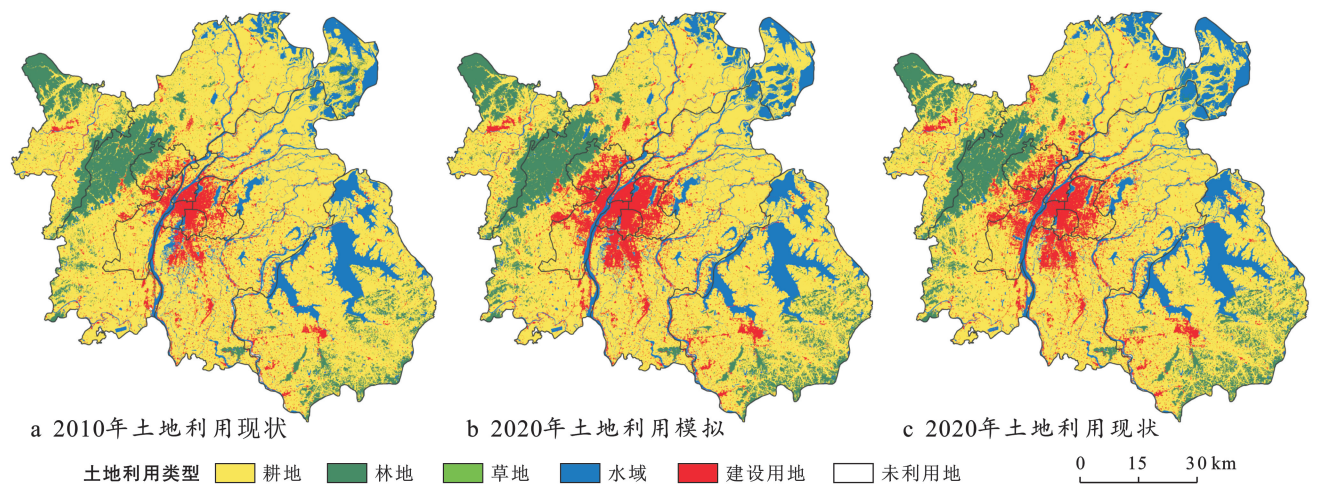


图 1 2010,2020 年南昌市土地利用现状和 2020 年土地利用模拟

Fig.1 Current land use in 2010, 2020 and land use simulation of Nanchang City in 2020

3 结果与分析

3.1 多情景土地利用模拟数量结构分析

基于碳密度和碳排放系数,运用线性规划方法,将地类面积作为变量,建立碳储量最大和碳排放最小的土地利用结构优化模型并求解,得到碳排放最小和碳储量最大情景下的面积、碳储量和碳排放量,并设置自然发展情景作为对照(表 2)。综合来看,碳排放最小情景和碳储量最大情景与自然发展情景相比,都能达到增汇减排的效果。碳排放最小情景虽然实现了减少碳排放的目标,但碳储量增加不明显,而碳储量最大情景通过碳增汇和碳减排两方面对土地利用结果进行优化,优化效果最佳。

在碳排放最小情景下,碳排放量为 5.25×10^6 t,碳储量为 6.03×10^7 t,相较于自然发展情景碳排放量

少 6.26×10^5 t,碳储量多 2.72×10^5 t。碳排放最小情景下耕地面积比 2020 年减少 17 455.63 hm^2 ,比自然发展情景多 7 914.1 hm^2 ,建设用地面积比 2020 年多 6 649.10 hm^2 ,但是比自然发展情景少 9 902.62 hm^2 ,林地、水域面积相较于自然发展情景有所增加,草地和未利用地面积基本不变。碳储量最大情景下,碳排放量为 5.25×10^6 t,碳储量为 6.10×10^7 t,相较于自然发展情景碳排放量少 6.21×10^5 t,碳储量多 9.60×10^5 t。

碳储量最大情景和碳排放最小情景与自然发展情景的土地利用结构差异主要存在于耕地和建设用地;碳储量最大情景和碳排放最小情景下林地、草地、建设用地面积保持一致,耕地、水域和未利用地存在一定差异。碳储量最大情景和碳排放最小情景下都有助于耕地保护,但碳储量最大情景对耕地保护更加

严格,耕地面积比碳排放最小情景多 6 932.3 hm²,碳储量最大情景下的水域面积比自然发展情景少 4 199.42 hm²,碳排放最小情景下的水域面积比自然发展情景多 2 547.58 hm²。

表 2 碳排放最小和碳储量最大情景下 2030 年南昌市土地利用结构优化
Table 2 Optimization of land use structure of Nanchang City in 2030 under minimum carbon emission scenario and maximum carbon stock scenario

土地利用类型	碳排放最小情景			碳储量最大情景			自然发展情景		
	面积/ hm ²	碳储量/ 10 ⁴ t	碳排放量/ 10 ⁴ t	面积/ hm ²	碳储量/ 10 ⁴ t	碳排放量/ 10 ⁴ t	面积/ hm ²	碳储量/ 10 ⁴ t	碳排放量/ 10 ⁴ t
耕地	436 218.00	4 400.13	20.07	443 150.30	4 470.06	20.38	428 303.90	4 320.30	19.70
林地	92 040.23	1 266.84	−5.64	92 040.23	1 266.84	−5.64	92 860.51	1 278.13	−5.69
草地	252.70	2.89	0.00	252.70	2.89	0.00	133.74	1.53	0.00
水域	109 169.00	0.00	−2.76	102 422.00	0.00	−2.59	10 6621.42	0.00	−2.70
建设用地	80 722.36	355.50	512.99	80 722.36	355.50	512.99	90 624.98	399.11	575.92
未利用地	336.12	2.05	0.00	150.82	0.92	0.00	193.86	1.18	0.00
总计	718 738.41	6 027.42	524.65	718 738.41	6 096.21	525.14	718 738.41	6 000.26	587.23

3.2 多情景土地利用模拟空间结构分析

在ArcGIS和 GeoSOS-FLUS 软件的支持下,用地规模预测、各用地类型开发适宜性概率图集、限制转

换区、各邻域权重参数与转换成本矩阵设定后,通过元胞自动机循环迭代分析,完成南昌市 2030 年的土地利用模拟,多情景土地利用空间模拟结果见图 2。

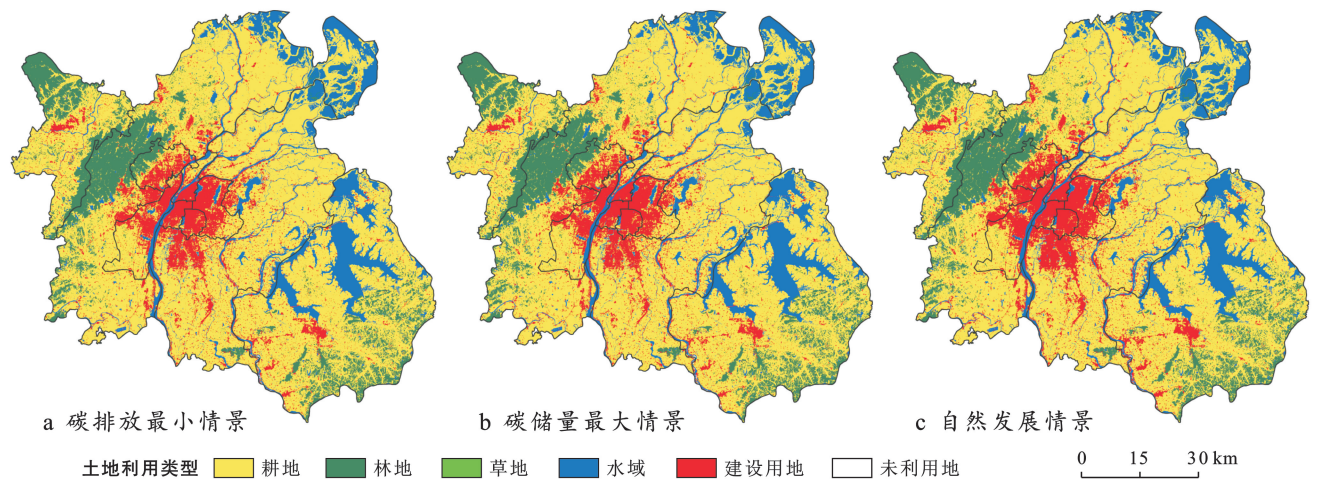


图 2 2030 年南昌市多情景土地利用模拟

Fig.2 Multi-scenario land use simulation of Nanchang City for 2030

通过两两情景间的栅格计算,反映各情景下碳储量和碳排放量在空间上的差异,由于研究区内耕地、水域面积基数大,碳储量最大情景和碳排放最小情景相比于自然发展情景其碳储量和碳排放量不变区域面积占比超 95%;碳储量最大情景和碳排放最小情景相比于自然发展情景其碳排放量增加区域和减少区域面积比接近 3 : 7,碳储量增加区域和减少区域面积比接近 7 : 3。

由图 3 可知,相较于自然发展情景,在碳储量最

大情景和碳排放最小情景下碳排放减少区域和碳储量增加区域主要集中分布在中部和南部,即南昌市建设用地边缘,中部建设用地以北有国家级著名风景区梅岭,以南是大片平坦耕地,应对相关区域进行重点调控,缓解耕地、林地和建设用地的冲突,不仅能促进三生空间协调发展,还有利于双碳目标的实现,碳排放增加区域和碳储量减少区域则零散分布在西北部 and 东南部,该区域主要分布有林地;比较碳储量最大和碳排放量最小情景,两者的差异也主要体现在中部。

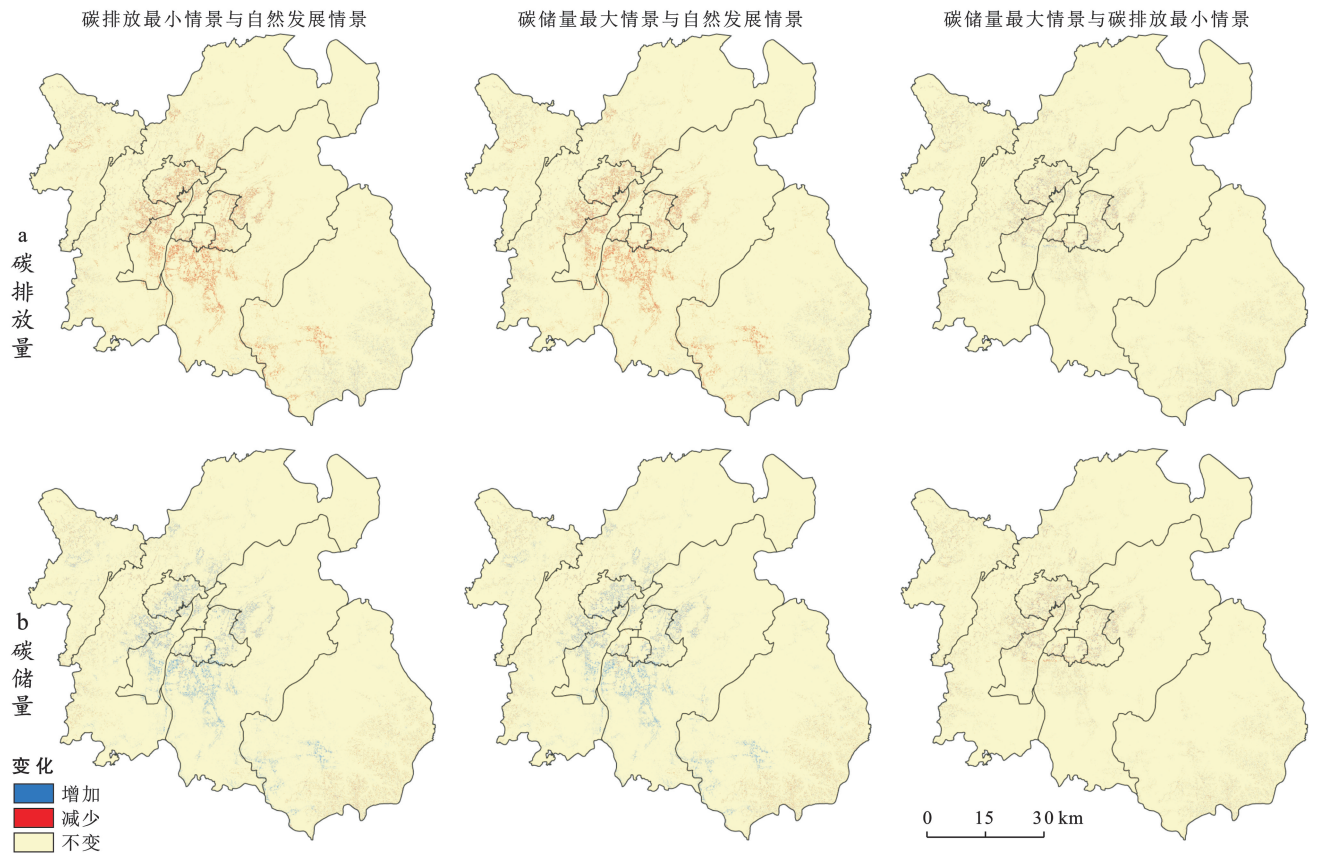


图 3 南昌市多情景土地碳储量和碳排放量差异分析

Fig.3 Analysis of differences in land carbon stock and emissions of Nanchang City under multiple scenarios

4 讨论与结论

4.1 讨论

优化调控的“核心”是增汇减排,首先保障建设用地供给以满足经济发展,同时通过生态保护提高园林用地的“碳汇”能力,总体实现区域“低碳化”,从多情景土地碳储量和碳排放量差异分析结果来看,建设用地边缘式扩张强度不同是造成土地碳储量和碳排放量空间差异的主要原因,对南昌市主城区与梅岭边缘以及进贤县与大公岭边缘等空间冲突区域进行重点监测,加强管控,防止建设占用。结合模拟分析结果与研究区实际情况提出相关调控措施:严格按照规划,优化土地利用结构,围绕南昌市“一主四副”的空间结构布局,对老城中心和红谷滩中心及拓展区域组成的主城区,加强建设用地管控,合理利用存量空间;围绕“一区四园多点”的产业空间格局,加大对生态工业示范园区、低碳产业园区建设,实现工业土地集约节约,提高工业效益,并降低物耗和温室气体排放;对区域内重要的农业生产、生态保护区域,通过国土综合整治和生态修复,优化耕地空间,提高环境效益,增大区域碳汇能力。

在区域土地利用变化驱动因子分析中,选取了自

然因子(DEM、坡度、坡向、年均降水量、年均气温、水体)和社会经济因子(距乡镇/城市中心的距离、人口密度、GDP 密度、夜间灯光、距城市主干路/高速公路/铁路的距离、距火车站/机场的距离)共 12 个指标进行分析。2020 年的 GDP 值、夜间灯光、距火车站/机场的距离、距城市主干路/高速公路/铁路的距离和距乡镇/城市中心的距离共 5 个社会经济因子对土地利用程度解释力相较于 2010 年有不同程度的提高;根据 2010 年和 2020 年的双因子交互结果,单因子与其他因子的交互作用对其解释力有不同程度的增强,交互类型均表现为双因子增强或非线性增强,在不同阶段,GDP 和夜间灯光与其他驱动因子进行交互作用均表现出较强的解释力。研究表明土地利用变化是由上述自然、社会经济因子相互作用而形成的结果,在短期内社会经济因子逐步成为推动研究区土地利用变化的主导因素。接下来可以进一步考虑社会经济、政策制度因子,构建更为完善的土地利用变化驱动指标体系。

本文使用土地利用类型对应的碳密度和碳排放系数估算碳排放量和碳储量,与实测值可能存在一定差距,但是通过对比不同情景下土地利用类型碳排放量和碳储量的差距,仍具有相对意义。此外,本文在

设置土地利用结构模型约束条件时,由于资料收集不全面等原因具有一定的局限性,如何获取更多土地政策资料,预测更加合理的土地利用结构,是今后需要重点关注的方向。

4.2 结论

本文基于低碳导向,通过构建以碳排放最小化和碳储量最大化为目标的多元线性模型求最优解,对南昌市 2030 年土地利用类型数量结构进行优化,并使用 FLUS 模型进行 2030 年土地利用模拟分析。

(1) 对土地利用驱动因子分析可知,土地利用变化驱动力是综合性的,后期社会经济因子成为推动土地利用变化的主导因素。同时本文通过驱动因子筛选、栅格尺度、扩张领域等多种方式提高土地利用模拟的精度,精度检验 kappa 系数为 0.882,总体精度 OA 为 93.5%,说明使用 FLUS 模型对南昌市 2030 年土地利用状况进行模拟具有较高适用性。

(2) 根据数量结构分析,碳储量最大和碳排放最小情景下土地利用碳排放均小于自然发展情景,碳储量均大于自然发展情景,综合来看,碳汇最大化情景下土地利用结构优化效果更优。低碳情景主要通过保护耕地增加碳储量,通过控制建设用地有序扩张降低碳排放量,两者在林地、草地、建设用地面积保持一致,在耕地、水域和未利用地存在差异。

(3) 根据空间结构分析,相较于自然发展情景,低碳情景下建设用地在空间分布上相对集中,且碳排放减少区域和碳储量增加区域多分布于中部和南部的建设用地边缘,落实生态保护和耕地保护政策,对相关区域进行重点调控,有助于南昌市“双碳”目标早日实现。

[参 考 文 献]

- [1] Huang Shiqi, Xi Furui, Chen Yiming, et al. Land use optimization and simulation of low-carbon-oriented: a case study of Jinhua, China[J]. Land, 2021, 10(10): 1020.
- [2] 曹周亮,张欣蓉,员学锋,等.基于土地利用变化的陕西省县域碳排放时空变化及影响因素研究[J].水土保持通报,2022,42(5):376-385.
- [3] Wang Yao, Guo Chihui, Chen Xijie, et al. Carbon peak and carbon neutrality in China: goals, implementation path and prospects [J]. China Geology, 2021, 4(4): 720-746.
- [4] Wang Yilong, Wang Xuhui, Wang Kai, et al. The size of the land carbon sink in China [J]. Nature, 2022, 603(7901): E7-E9.
- [5] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J].生态学报,2015,35(17):5898-5907.
- [6] 周嘉,王钰萱,刘学荣,等.基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J].地理科学,2019,39(12):1955-1961.
- [7] 马远,刘真真.黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究[J].生态经济,2021,37(7):35-43.
- [8] 易丹,欧名豪,郭杰,等.土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J].资源科学,2022,44(8):1545-1559.
- [9] 邱凤英,肖复明,郭捷,等.江西金盆山林区天然常绿阔叶林生态系统碳储量研究[J].中南林业科技大学学报,2020,40(1):105-113.
- [10] Yi Hongtao, Krause R M, Feiock R C. Back-pedaling or continuing quietly?: assessing the impact of ICLEI membership termination on cities' sustainability actions [J]. Environmental Politics, 2017, 26(1):138-160.
- [11] Köne A C, Büke T. Factor analysis of projected carbon dioxide emissions according to the IPCC based sustainable emission scenario in Turkey [J]. Renewable Energy, 2019, 133:914-918.
- [12] 乔治,蒋玉颖,贺瞳,等.土地利用变化模拟研究进展[J].生态学报,2022,42(13):5165-5176.
- [13] 张晓娟,周启刚,王兆林,等.基于 MCE-CA-Markov 的三峡库区土地利用演变模拟及预测[J].农业工程学报,2017,33(19):268-277.
- [14] 田多松,傅碧天,吕永鹏,等.基于 SD 和 CLUE-S 模型的区域土地利用变化对土壤有机碳储量影响研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(4):613-620.
- [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] 林伊琳,赵俊三,陈国平,等.基于 MCR-FLUS-Markov 模型的区域国土空间格局优化[J].农业机械学报,2021,52(4):159-170.
- [17] 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.
- [18] 杨丽萍,张静,贡恩军,等.GEE 联合多源数据的西安市土地利用时空格局及驱动力分析[J].农业工程学报,2022,38(2):279-288.
- [19] 张扬,周忠发,黄登红,等.喀斯特山区耕地时空演变与影响因子分析[J].农业工程学报,2020, 36(22): 266-275.
- [20] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [21] Li Shicheng, Bing Zilu, Jin Gui. Spatially explicit mapping of soil conservation service in monetary units due to land use/cover change for the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Remote Sensing, 2019, 11(4):468.

- [22] 韩增林,孟琦琦,闫晓露,等.近 30 年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系[J].生态学报,2020,40(8):2555-2566.
- [23] 徐丽,何念鹏,于贵瑞.2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J].中国科学数据,2019,4(1):90-96.
- [24] 张斌,李璐,夏秋月,等.“三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响:以武汉城市圈为例[J].生态学报,2022,42(6):2265-2280.
- [25] 柯新利,唐兰萍.城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响:以湖北省为例[J].生态学报,2019,39(2):672-683.
- [26] 奚小环,李敏,张秀芝,等.中国中东部平原及周边地区土壤有机碳分布与变化趋势研究[J].地学前缘,2013,20(1):154-165.
- [27] Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Lai Li, et al. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China [J]. Environmental Science & Policy, 2013,25:50-61.
- [28] Zhang Fan, Zhan Jinyan, Zhang Qian, et al. Impacts of land use/cover change on terrestrial carbon stocks in Uganda [J]. Physics and Chemistry of the Earth (Parts A/B/C), 2017,101):195-203.
- [29] 张润森,濮励杰,文继群,等.建设用地扩张与碳排放效应的库兹涅茨曲线假说及验证[J].自然资源学报,2012,27(5):723-733.
- [30] 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.
- [31] 石洪听,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.
- [32] 杨静媛,张明,多玲花,等.江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区[J].环境科学研究,2022,35(10):2312-2321.
- [33] 牛亚文,赵先超,胡艺觉.基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究[J].环境科学学报,2021,41(9):3847-3856.
- [34] 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.
- [35] 徐影,郭楠,茹凯丽,等.碳中和视角下福建省国土空间分区特征与优化策略[J].应用生态学报,2022,33(2):500-508.
- [36] 赖力.中国土地利用的碳排放效应研究[D].江苏 南京:南京大学,2010.
- [37] 李国煜,王嘉怡,曹宇,等.碳排放约束下的福建省城镇建设土地利用效率动态变化与影响因素[J].中国土地科学,2020,34(4):69-77.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 王旭东,姚尧,任书良,等.耦合 FLUS 和 Markov 的快速发展城市土地利用空间格局模拟方法[J].地球信息科学学报,2022,24(1):100-113.
- [41] Liang Xu, Liu Xiaoping, Li Dan, et al. Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2018,32(11):2294-2316.
- [42] 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.
- [43] Mei Zhixiong, Wu Hao, Li Shiyun. Simulating land-use changes by incorporating spatial autocorrelation and self-organization in CLUE-S modeling: a case study in Zengcheng District, Guangzhou, China [J]. Frontiers of Earth Science, 2018,12(2):299-310.