

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.06.010

# 基于SD法的湖南省土地利用碳排放情景 方案设定与仿真模拟

陈紫君, 赵先超, 倪筱珈

(湖南工业大学 城市与环境学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 设定湖南省土地利用碳排放情景方案, 并以此探求碳排放增长演化规律。基于系统动力学(system dynamics, SD)原理与方法, 统筹考虑经济、能源、土地利用、人口等因素对湖南省土地利用碳排放的影响作用, 构建湖南省土地利用碳排放SD模型, 并设定趋势发展等7种情景方案进行动态仿真模拟。按照趋势发展情景, 2017—2030年湖南省土地利用碳排放量将由7 648.8万t增长至11 217.8万t, 年均增长率为3.33%; 比较其余6种政策情景, 基于技术进步和能源结构优化的情景, 到目标年土地利用碳排放量比趋势发展情景分别减少了206.4万t和517.5万t, 年均增长率分别为3.17%和2.89%; 在综合调控情景中, 目标年土地利用碳排放量较趋势发展情景减少了560.6万t, 减排效果最为显著。

**关键词:** 土地利用碳排放; 情景方案; 仿真模拟; 系统动力学; 湖南省

**中图分类号:** F301.24

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2019)06-0067-08

**引文格式:** 陈紫君, 赵先超, 倪筱珈. 基于SD法的湖南省土地利用碳排放情景方案设定与仿真模拟[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(6): 67-74.

## Scenario Setting and Simulation of Land-Use Carbon Emissions in Hunan Province Based on System Dynamics

CHEN Zijun, ZHAO Xianchao, NI Xiaojiao

(College of Urban and Environmental Sciences, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** A scenario setting has been made for the land-use carbon emissions in Hunan Province, followed by an inquiry made into the growth evolution for carbon emissions. Based on the principle and method of system dynamics (SD), with a consideration given to the effects of economy, energy, land use and population on land-use carbon emissions in Hunan Province, SD model of land-use carbon emissions in Hunan Province is to be constructed, with seven scenarios, including trend development, set up for the dynamic simulation. According to the trend development scenario, the land-use carbon emissions in Hunan Province will increase from 76.488 million tons to 112.178 million tons in 2017—2030, with an average annual growth rate of 3.33%. Compared with the other six policy scenarios, and based on the scenarios of technological progress and energy structure optimization, the land-use carbon emissions of

**收稿日期:** 2019-03-29

**基金项目:** 教育部人文社会科学规划基金资助项目(17YJCZH258), 湖南省社会科学基金资助项目(17JD25), 湖南省社会科学评审委课题基金资助项目(XSP19YBZ142), 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2018B738)

**作者简介:** 陈紫君(1995-), 女, 江西上饶人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为城乡发展与区域规划,

E-mail: 358329265@qq.com

**通信作者:** 赵先超(1983-), 男, 山东郓城人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为城乡发展与区域规划,

E-mail: zhaoxianchao@hut.edu.cn

in the target year are to be reduced by 2.064 million tons and 5.175 million tons, respectively, with an average annual growth rate of 3.17% and 2.89%. With all the policies integrated in a control scenario, the land-use carbon emissions in the target year are to decrease by 5.606 million tons compared with the trend development scenario, with its emission reduction effect the most significant.

**Keywords:** land-use carbon emissions; scenario; simulation; system dynamics; Hunan Province

## 1 研究背景

已有研究表明,陆地碳排放主要来源于土地自身利用状态的改变和依附在土地上的经济发展、城市建设等人类活动<sup>[1]</sup>;与此同时,土地利用规模、结构、方式的变化会直接或间接地引起碳储量及与大气之间的碳通量变化,从而推动区域碳循环的过程和速度发生改变<sup>[2]</sup>。因此,从系统的角度研究土地利用碳排放对低碳城市建设以及低碳空间规划等具有重要的现实意义。

近年来,国内外的学者们对于土地利用碳排放展开了深入的研究,主要集中在土地利用碳排放的强度<sup>[3-4]</sup>、土地利用变化的碳效应<sup>[5-6]</sup>、土地利用碳排放的影响机理<sup>[7-9]</sup>、区域不同层级碳排放的核算<sup>[10-11]</sup>、区域土地利用集约水平与碳排放作用之间的关系<sup>[12-15]</sup>、土地利用结构的优化方案<sup>[16-17]</sup>、土地利用碳排放的安全评估<sup>[18]</sup>等方面。客观来看,上述研究成果为区域土地利用碳减排和土地利用结构优化提供了一定的理论与实践支撑,但是这些研究主要是采用单一的线性规划方法分析土地利用碳排放的变化,而对于不同影响因素下区域土地利用碳排放的动态仿真及预测分析涉及较少,对不同影响因素之间的作用机理分析不足,且对政策、经济目标等人为因素的考虑较少。

从开展土地利用碳排放的动态仿真模拟所主要应用的系统动力学来看,目前该方法已被广泛地应用于可持续环境管理预测<sup>[19]</sup>、区域低碳经济发展模式预测<sup>[20]</sup>、土地资源预测<sup>[21]</sup>等领域,但在土地利用碳排放预测方面的应用还较少,而应用系统动力学方法开展湖南省土地利用碳排放仿真预测的研究尚未见。因此,本文拟以此为切入点,以湖南省为案例研究区,基于系统动力学(system dynamics, SD)原理与方法,从系统角度分析社会经济发展、土地利用变化、能源消耗、人口变化等因素与土地利用碳排放之间的相互作用,构建湖南省土地利用碳排放系统动力学模型,动态模拟、分析不同政策情景下的土地利用碳排放演变趋势与演变规律,为探寻湖南省低碳土地利用模式

提供一定的理论参考,同时为新时期制定针对性的低碳空间规划提供一定的实践依据。

## 2 研究区概况与数据来源

### 2.1 研究区概况

湖南省属于中部六省之一,地处中国中部、长江中游,东邻江西,西靠贵州、重庆,南与广东、广西毗邻,北与湖北接壤。2016年,湖南省GDP总值达到31 551.37亿元人民币,常住人口6 822万人,其中城镇人口为3 598.60万人,城镇化率增速同比增长3.65%;根据土地调查的结果,全省土地资源为 $2\ 118.50 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,其中耕地资源为 $414.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,主要分布在洞庭湖平原,是中国重要的商品粮生产基地。“十二五”规划末,湖南省全年煤炭消费量为11 142万t,用电量为1 448 108 kW·h,天然气消费量为26 108 m<sup>3</sup>;非化石能源占一次能源的消费比例为12.4%,比2010年提高了4.4%;单位地区生产总值能源消耗累计降低了21%,单位地区生产总值CO<sub>2</sub>排放累计降低了18%<sup>[22]</sup>。

### 2.2 数据来源

本研究所涉及的人口、经济数据主要来源于《中国统计年鉴》(2007—2017)、《湖南省统计年鉴》(2007—2017);历史能源数据主要来源于《中国能源统计年鉴》(2007—2017)、《中国环境统计年鉴》(2007—2017)、《湖南省统计年鉴》(2007—2017);历史土地利用数据主要来源于《湖南省统计年鉴》(2007—2017)、《湖南省土地利用总体规划(2006—2020)》、湖南省土地利用变更调查数据(2006—2016)等。

## 3 研究方法

### 3.1 不同土地利用方式碳排放测算方法

结合现行的土地利用分类体系和湖南省土地利用的实际情况,可将用地分为建设用地、农用地和未利用地3大类,其中农用地可分为林地、园地、草地、耕地、其他农用地5个类型。结合各类型土地利用碳

排放的测算方法, 最终将建设用地、耕地作为碳源, 水域及水利设施用地、农用地和未利用地作为碳汇。耕地作为除建设用地外的另一大碳源, 其碳排放主要发生在农田化肥施用、农业机械使用和灌溉过程, 具体的计算方式参考赵荣钦等<sup>[23]</sup>的研究。在建设用地上进行的生活性活动是建设用地碳排放的主要来源, 本文建设用地碳排放测算包括各类生产性能源消耗及生活垃圾废水处理, 建设用地碳排放测算方法参考文献[24-26]; 碳汇用地中耕地碳吸收主要发生在农作物生长发育过程中的光合作用, 具体的测算方法参考文献[23]; 其他用地碳吸收测算采用直接碳排放系数法<sup>[9]</sup>进行。

### 3.2 系统动力学方法

系统动力学模型的创新之处在于构建了数学模型, 运用模型分析庞大复杂的系统问题, 并提出解决问题的对策和政策建议。SD模型作为一种综合性仿真模型, 现已普遍应用于不同国家、地区及行业的产业结构调整、能源消耗、土地资源、温室气体等研究中。

## 4 结果与分析

### 4.1 系统边界的确定

本研究的空间边界为湖南省的行政边界线; 时间边界为 2006—2030 年 (基期年为 2006 年, 目标年设为 2030 年), 以 1 a 作为前后两个时间点的差值, 其中历史数据年限为 2006—2016 年, 仿真预测的年限为 2017—2030 年。

### 4.2 模型的构建

#### 4.2.1 系统结构分析

土地利用碳排放系统主要涉及人口、社会发展、区域建设、产业布局、资源能源消耗等因素。将上述因素进行归类分析, 主要包括人口、社会经济、能源、土地利用等方面。从该层面出发, 将湖南省土地利用碳排放系统划分为人口、社会经济、能源、土地利用、碳排放 5 个子系统, 湖南省土地利用碳排放各子系统间通过物质、信息、能量的转换等方式, 进行系统相互间的联系与沟通, 各系统间的因果关系详见图 1。

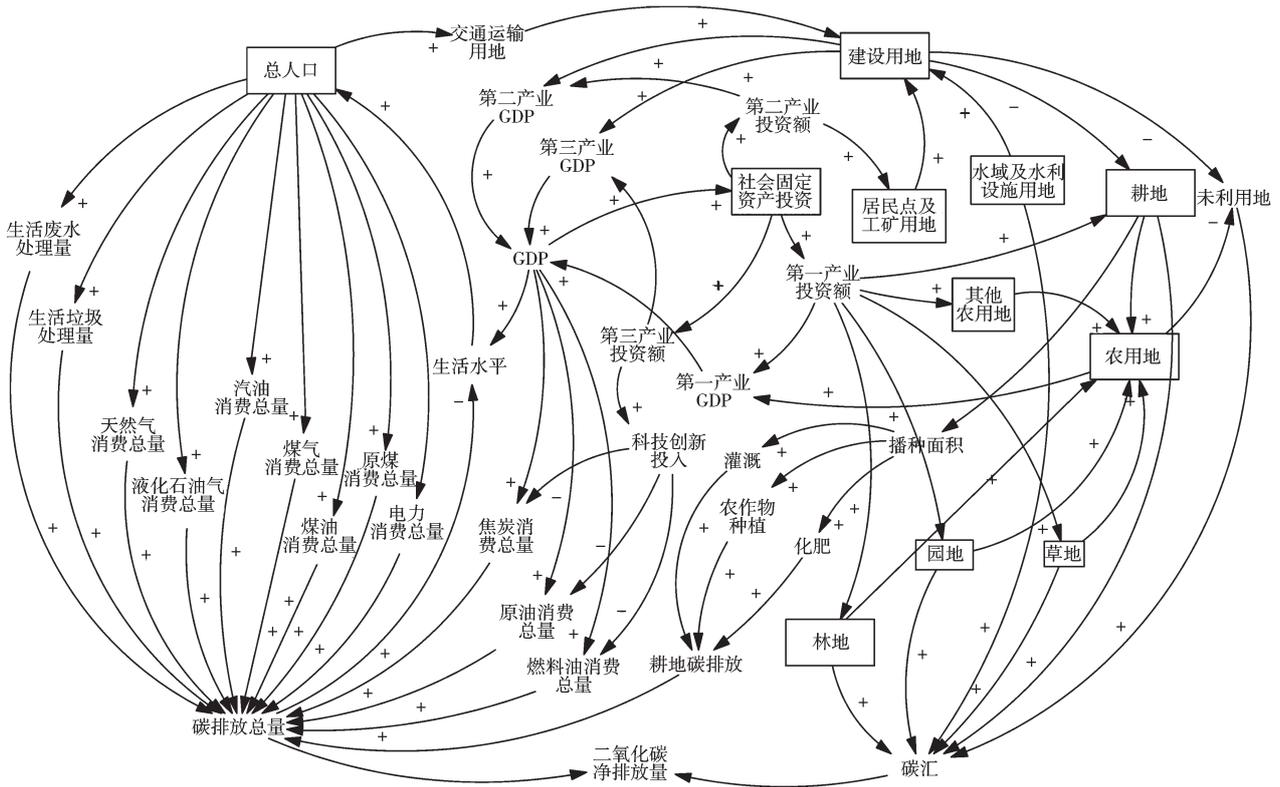


图 1 湖南省土地利用碳排放系统因果关系图

Fig. 1 Causality map of land-use carbon emission system in Hunan Province

#### 4.2.2 构建土地利用碳排放系统流图

在湖南省土地利用碳排放系统因果反馈关系分析的基础上, 进一步明确、设定各子系统的变量及参数, 从而构建土地利用碳排放系统流图。其中, 人口子系统主要包括人口总量、综合增长率和人口

增加量 3 个变量; 社会经济子系统涉及 GDP、各产业 GDP、社会固定资产投资、各产业投资比例、各产业地均 GDP 等 17 个变量; 能源子系统包括单位 GDP 燃料油消费量、单位 GDP 原油消费量、原煤消费量等 20 个变量; 土地子系统包括各种用地类型、

各类用地的增长量、建设占用耕地等 18 个变量；碳排放子系统包括碳排放量、碳汇量等 21 个变量。然后建立土地利用碳排放系统的相应方程，模型中水平变量初始值采用 2006 年的统计数据，其他参数量主

要采用表函数法、经验公式法、线性回归法等方法确定。在 Vensim 软件中，不断调试修正土地利用碳排放 SD 模型，使 SD 模型中各个子系统及子系统内部因素结合起来，绘制了如图 2 所示模型存量流量图。

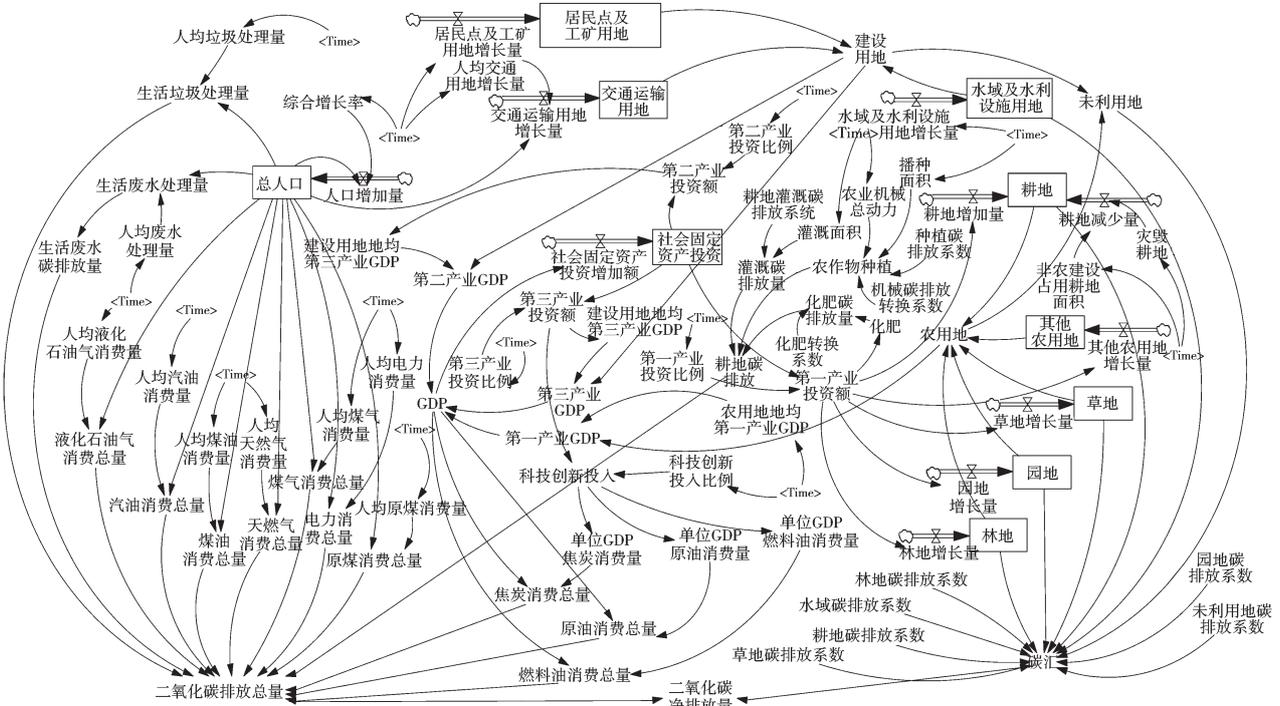


图 2 湖南省土地利用碳排放系统存量流量图

Fig. 2 Stock flow map of land-use carbon emission system in Hunan Province

土地利用碳排放系统模型中涉及的主要方程包括：

- 1) 总人口 = INTEG (人口增加量, 6 342), 单位为万人;
- 2) 天然气消费总量 = 人均天然气消费量 × 总人口, 单位为万 t;
- 3) 燃料油消费总量 = 单位 GDP 燃料油消费量 × GDP, 单位为万 t;
- 4) 生活废水碳排放量 = 生活污水的耗电系数 × 生活废水排放量 × 电力排放因子, 单位为万 t;
- 5) 耕地碳排放量 = 施用化肥的碳排放量 + 使用农业机械的碳排放量 + 灌溉过程带来的碳排放量, 单位为万 t;
- 6) 第二产业 GDP = 建设用地地均第二产业 GDP × 建设用地面积, 单位为亿元;
- 7) 碳排放总量 = 能源消耗碳排放量 + 生活垃圾、废水处理碳排放量 + 耕地碳排放量, 单位为万 t;
- 8) 碳汇量 = 各类碳汇面积 × 各类用地的碳排放系数, 单位为万 t。

4.3 模型检验

建立 SD 模型后，还需要对模型进行可行性检验，

即将模型运行结果与实际情况进行对比分析。其中，在模型的量纲检验环节，主要通过 Vensim 软件进行，经过检验，模型运行并未产生不合理的结果；在模型的历史性检验环节，主要选取 2006—2016 年湖南省 GDP、人口、原油消费量、建设用地面积、农用地面积、碳汇量、未利用地面积、土地利用碳排放量等模拟值与历史值进行比较，其相对误差率均不超过 5%，表明该模型通过了历史实际仿真性检验；在模型的灵敏度分析环节，筛选了 9 个主要输出变量对 13 个变量参数变化的灵敏度进行检验，检验结果表明，除个别变量参数的灵敏度大于 10% 外，其余变量参数变化对系统的影响较小，说明该模型对参数变化不敏感，模型具有较好的稳定性，可以进行实际的政策分析和模拟。

4.4 趋势发展模拟

通过对湖南省土地利用碳排放的趋势发展仿真模拟，得到如图 3 所示的湖南省 2006—2030 年土地利用碳排放的模拟数据和变化趋势图。可见，随着经济社会的发展，预测年限内湖南省土地利用碳排放量将大体保持逐年递增的发展趋势。

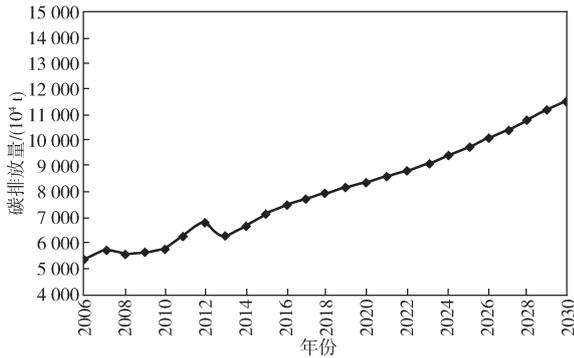


图 3 2006—2030 年湖南省土地利用碳排放变化趋势图  
Fig. 3 Trend map of land-use carbon emissions in Hunan Province from 2006 to 2030

由图 3 可知, 可将 2006—2030 年湖南省土地利用碳排放模拟增长划分成两个阶段。2006—2013 年为第一阶段, 此阶段土地利用碳排放量的增长较不稳定。其中 2006—2012 年土地利用碳排放量总体呈上升趋势, 而 2013 年由于煤炭、焦炉煤气和电力等的消耗减少, 土地利用碳排放量明显下降。2013—2030 年为第二阶段, 与上一阶段相比, 该阶段的土地利用碳排放量整体呈上升趋势, 年均增长速率为 4.35%, 土地利用碳排放总量增加了 4 927.89 万 t。将第二阶段分为 3 个时期: 2013—2016 年为前期, 该时期土

地利用碳排放量增长较快, 年均增长速率达 4.51%, 土地利用碳排放总量由 6 289.91 万 t 增长至 7 424.42 万 t; 2016—2024 年为中期, 较前期, 该期土地利用碳排放量增长速率减慢, 年均增长速率降低了 1.92%; 2024—2030 年为后期, 该时期土地利用碳排放量呈线性增长, 年均增长速率为 3.22%, 较中期提高了 0.66%, 碳排放总量增加了 2 065.78 万 t。该模型预测结果表明, 按照当前的发展趋势, 2030 年及未来几年湖南省都很难达到碳排放峰值, 而这与国家在强化应对气候变化行动中提出的将于 2030 年左右达到二氧化碳排放峰值的目标偏离。因此, 应加快编制湖南省低碳发展战略规划, 以有效制约湖南省土地利用碳排放量的快速增长态势。

#### 4.5 情景方案设定与仿真模拟分析

##### 4.5.1 情景方案设定

本研究依据《湖南省国民经济和社会发展第十三个五年规划》, 以及前期的敏感度分析结果等相关资料, 除趋势发展情景外, 还设定了产业结构调整、经济高速发展、技术进步、能源结构优化、土地利用结构优化及综合调控等 6 种政策情景, 具体情景名称及其典型特征见表 1。

表 1 政策模拟情景

Table 1 Political simulation scenarios

情景	情景名称	情景典型特征
1	趋势发展情景	模型原始参数和各变量保持不变, 不实施任何减排措施
2	经济高速发展情景	调控经济发展速度, 将第一、二、三产业的地均 GDP 年均增长速率分别提高 2.5%
3	产业结构调整情景	调整产业结构, 到 2030 年第一产业投资比例保持原有状态, 第二产业投资比例下降 3%, 第三产业投资比例提高 3%
4	技术进步情景	调整单位 GDP 能耗, 2016—2025 年单位 GDP 能耗年均下降 3%, 2026—2030 年单位 GDP 能耗年均下降 2%
5	能源结构优化情景	调整能源消费结构, 到 2030 年降低煤炭能源消费比例至 29%, 提高天然气能源消费比例至 12%
6	土地利用结构优化情景	调整土地利用结构, 到 2030 年建设用地比例降至 9.61%
7	综合调控情景	同时调整经济增长速率、产业结构、土地利用结构、能源效率、能源消费结构, 第一、二、三产业的地均 GDP 年均增长速率分别提高 2.5%; 2016—2025 年单位 GDP 能耗年均下降 3%, 2026—2030 年单位 GDP 能耗年均下降 2%; 到 2030 年, 第二产业投资比例下降 3%, 第三产业投资比例提高 3%, 煤炭能源消费比例降至 29%, 提高天然气能源消费比例至 12%

##### 4.5.2 动态仿真模拟分析

按照表 1 设定的 7 种政策情景, 分别得到湖南省 2017—2030 年的土地利用碳排放量模拟结果, 如表 2 和图 4 所示。根据表 2 和图 4 可知:

1) 经济高速发展情景中, 第一、二、三产业地均 GDP 的年均增长速率分别提高了 2.5%, 到 2030 年全省 GDP 年均增长速率达 8.83%, 比《湖南省国民经济和社会发展第十三个五年规划》中全省 GDP 的预期值高出了 3.3%, 土地利用碳排放量的年均增长速率达 3.66%, 其碳排放量增加了 3 595.03 万 t, 均高于其它情景模拟的结果, 可见, 经济发展水平的提

高对湖南省土地利用碳排放量的攀升具有较大作用。然而, 从湖南省工业化、城镇化所处的阶段来看, 在未来很长的一段时间内, 保持经济稳健增长及推进民生福祉建设仍是全省的发展重点, 经济增长定会带来碳排放量增加, 未来的减碳任务仍然艰巨。

2) 产业结构调整情景中, 第二产业向第三产业转移, 到 2030 年, 第二产业投资比例由 32.52% 下降到 30%, 第三产业投资由 61.78% 上升到 64.78%。2017—2024 年土地利用碳排放总量略低于趋势发展情景, 但 2024 年后土地利用碳排放增长速率和碳排放总量均略高于趋势发展情景, 到 2030 年土地利用

碳排放量比趋势发展情景提高了 26.3 万 t。可见,调整产业结构对湖南省土地利用碳排放调控作用不显著,且湖南省正处于工业化中期,不宜大幅度降低第二产业的投资比例。

3) 技术进步情景和能源结构优化情景,主要分别通过提高能源的利用效率和优化能源消费结构产生作用,到模拟目标年时,土地利用碳排放量较趋势发展情景分别降低了 206.4 万 t 和 517.5 万 t,年均增长速率分别为 3.17% 和 2.89%。其中,提高能源利用效率对降低碳排放具有显著的作用,明显优于其它情景方案,且 2017—2023 年对湖南省土地利用碳排放的调控作用最佳。

4) 土地利用结构优化情景中,通过优化土地利用结构,控制农用地、建设用地及未利用地比例,减

少未利用地和农用地向建设用地转变,到 2030 年,土地利用碳排放量比趋势发展情景减少了 189.7 万 t,年均增长速率为 3.16%。从该情景模拟结果来看,合理配置土地资源与优化用地结构可引导产业结构优化,从而约束经济发展对建设用地的需求,保证相当的碳汇用地面积以抑制土地利用碳排放过快的增速。

5) 综合调控情景中,采用整合其它几种情景方案的综合调控方案,该方案下土地利用碳排放量由 7 612.16 万 t 增至 10 657.2 万 t,年均增长率为 2.86%,模拟目标年的土地利用碳排放量比趋势发展情景减少了 560.6 万 t,高于以上情景的碳排放量变化总和。因此,合理配置土地资源、提高能源效率和调整能源消费结构是今后湖南省实现土地利用碳减排的核心内容。

表 2 各情景下土地利用碳排放量模拟结果

Table 2 Simulation results of land-use carbon emissions under different scenarios

10<sup>4</sup>t

年份	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5	情景 6	情景 7
2017	7 648.80	7 672.44	7 649.07	7 624.29	7 615.33	7 647.13	7 612.16
2018	7 874.29	7 923.24	7 874.56	7 817.92	7 806.91	7 869.25	7 791.59
2019	8 096.23	8 169.58	8 096.10	8 000.57	7 994.52	8 086.22	7 954.88
2020	8 313.28	8 409.64	8 312.15	8 169.74	8 176.75	8 296.80	8 098.67
2021	8 523.81	8 641.25	8 520.86	8 322.54	8 351.97	8 499.63	8 219.12
2022	8 725.91	8 861.81	8 720.05	8 529.55	8 518.22	8 693.14	8 409.16
2023	8 917.33	9 068.22	8 907.14	8 774.27	8 673.23	8 875.58	8 624.05
2024	9 152.02	9 328.09	9 160.74	9 018.33	8 870.92	9 098.07	8 834.51
2025	9 467.38	9 672.48	9 478.15	9 309.61	9 148.65	9 397.80	9 112.68
2026	9 793.52	10 029.80	9 806.65	9 627.28	9 436.50	9 705.79	9 402.24
2027	10 131.00	10 400.90	10 146.80	9 955.71	9 735.00	10 022.40	9 700.99
2028	10 480.50	10 786.60	10 499.30	10 295.50	10 044.70	10 348.10	10 009.40
2029	10 842.50	11 187.80	10 864.90	10 647.20	10 366.30	10 683.10	10 328.00
2030	11 217.80	11 605.50	11 244.10	11 011.40	10 700.30	11 028.10	10 657.20

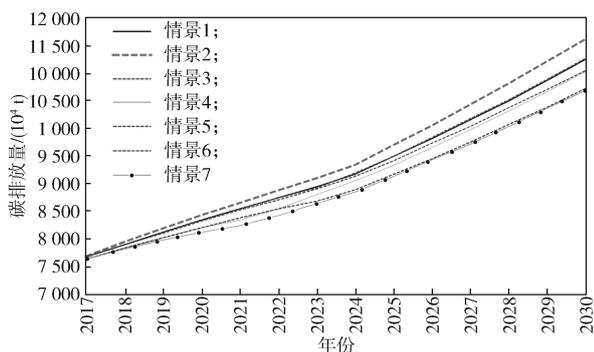


图 4 各情景土地利用碳排放预测模拟图

Fig. 4 Prediction simulation chart of land-use carbon emissions under different scenarios

## 5 结论与讨论

土地利用碳排放研究一直是学术界的热点之一。本研究构建了湖南省土地利用碳排放 SD 模型,通过设定趋势发展等 7 种情景方案进行动态仿真模拟

分析,得到如下主要研究结论:

1) 土地利用碳排放系统涵盖了人口、社会经济、能源、土地利用等多个领域,而以往单一的线性规划模型很难实现对非线性多重反馈问题的预测。本研究借助 SD 模型,能够掌握子系统及变量之间的反馈机制和动态发展趋势,弥补了线性规划模型缺乏动态性描述的不足;SD 模型的运行结果也表明,运用该模型预测湖南省土地利用碳排放量和进行相应的政策情景模拟是可行的。

2) 若外在条件不发生重大改变,以目前的趋势继续发展,湖南省土地利用碳排放总量将保持逐年递增的发展趋势,到 2030 年将达 11 217.8 万 t。因此,应加快推进低碳土地利用规划和低碳发展战略的制定,尽早实现低碳高效的土地利用。

3) 政策情景模拟结果显示,社会经济发展水平的提高加剧了区域土地利用碳排放量的增加,且影响显著,年均增长率达 3.66%,较趋势发展情景提高

了0.33%, 对此应逐步转变传统粗放式的经济增长方式, 加快形成发展新引擎, 早日实现低碳、高效的经济发展模式; 通过调整土地利用结构、能源消费结构, 以及提高能源利用效率均可以有效减少土地利用碳排放量。相对而言, 提高能源利用效率和优化能源结构的作用更加明显, 较趋势发展情景土地利用碳排放量分别减少了206.4万t和517.5万t, 年均增长率分别降低了0.26%和0.44%。在所有政策情景方案中, 综合调控情景中的减排效果最为显著, 表明新时期湖南省土地利用碳减排可采用综合调控方案, 如有效提高能源利用效率, 加快制定相应低碳土地利用规划指标体系等。

本研究基于系统动力学模型, 对湖南省土地利用碳排放进行了仿真模拟分析, 刻画了不同政策情景方案下湖南省土地利用碳排放的演进趋势, 可为新时期湖南省低碳土地利用模式提供一定的理论参考。然而, 值得说明的是, 由于模型的行为和结果主要取决于模型结构, 模型中一些变量选取和参数设定存在一定的主观性, 如何与其他优化模型结合, 提高土地利用碳排放系统仿真模拟的精度还需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 游和远, 吴次芳. 土地利用的碳排放效率及其低碳优化: 基于能源消耗的视角[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1875-1886.  
YOU Heyuan, WU Cifang. Carbon Emission Efficiency and Low Carbon Optimization of Land Use: Based on the Perspective of Energy Consumption[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(11): 1875-1886.
- [2] 赵荣钦, 刘英, 郝仕龙, 等. 低碳土地利用模式研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 190-194.  
ZHAO Rongqin, LIU Ying, HAO Shilong, et al. Research on the Low-Carbon Land Use Pattern[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(5): 190-194.
- [3] 唐洪松, 苏洋, 汪晶晶, 等. 碳排放视角下我国建设用地利用强度与效率研究[J]. 生态经济, 2018, 34(9): 25-30, 60.  
TANG Hongsong, SU Yang, WANG Jingjing, et al. Study on the Intensity and Efficiency of Construction Land Use from the Perspective of Carbon Emission in China[J]. Ecological Economy, 2018, 34(9): 25-30, 60.
- [4] ZHANG W T, HUANG B, LUO D. Effects of Land Use and Transportation on Carbon Sources and Carbon Sinks: A Case Study in Shenzhen, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 122: 175-185.
- [5] 李颖, 黄贤金, 甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊2): 102-107.  
LI Ying, HUANG Xianjin, ZHEN Feng. Effects of Land Use Patterns on Carbon Emission in Jiangsu Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(S2): 102-107.
- [6] 赵先超, 朱翔, 周跃云. 湖南省不同土地利用方式的碳排放效应及时空格局分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 941-949.  
ZHAO Xianchao, ZHU Xiang, ZHOU Yueyun. Effects of Land Uses on Carbon Emissions and Their Spatial-Temporal Patterns in Hunan Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(3): 941-949.
- [7] 王倩倩, 黄贤金, 陈志刚, 等. 基于环境负荷模型的中国碳排放情景分析[J]. 生态经济, 2009, 25(1): 53-54, 77.  
WANG Qianqian, HUANG Xianjin, CHEN Zhigang, et al. The Analysis on Carbon Emission Scenario Based on Environmental Loads Model[J]. Ecological and Economy, 2009, 25(1): 53-54, 77.
- [8] HOUGHTON R A, HOUSE J I, PONGRATZ J, et al. Carbon Emissions from Land Use and Land-Cover Change[J]. Biogeosciences, 2012, 9(12): 5125-5142.
- [9] HUTYRA L R, YOON B, ALBERTI M. Terrestrial Carbon Stocks Across a Gradient of Urbanization: A Study of the Seattle, WA Region[J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 783-797.
- [10] 谭丹, 黄贤金. 我国东、中、西部地区经济发展与碳排放的关联分析及比较[J]. 中国人口资源与环境, 2008, 18(3): 54-57.  
TAN Dan, HUANG Xianjin. Correlation Analysis and Comparison of the Economic Development and Carbon Emissions in Eastern, Central and Western Part of China[J]. China Population Resources and Environment, 2008, 18(3): 54-57.
- [11] 梅建屏, 徐健, 金晓斌, 等. 基于不同出行方式的都市微观主体碳排放研究[J]. 资源开发与市场, 2009, 25(1): 49-52.  
MEI Jianping, XU Jian, JIN Xiaobin, et al. Research of Urban Micro Subject Carbon Emission Based on Various Travel Mode[J]. Resource Development & Market, 2009, 25(1): 49-52.
- [12] 赵先超, 宋丽美. 湖南省农地利用碳排放与农业经济关系研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 976-981.  
ZHAO Xianchao, SONG Limei. Carbon Emission from Agricultural Land Use and Its Relationship with Agricultural Economy in Hunan Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(11): 976-981.
- [13] 许恒周, 郭玉燕, 陈宗祥, 等. 土地市场发育、城市

- 土地集约利用与碳排放的关系: 基于中国省际面板数据的实证分析 [J]. 中国土地科学, 2013, 27(9): 26-29.
- XU Hengzhou, GUO Yuyan, CHEN Zongxiang, et al. The Relationship Between Land Market Development, Urban Land Intensive Use and Carbon Emission: An Empirical Study Based on Provincial Panel Data in China[J]. China Land Science, 2013, 27(9): 26-29.
- [14] 周璟茹, 赵华甫, 吴金华. 关中城市群土地集约利用与碳排放关系演化特征研究 [J]. 中国土地科学, 2017, 31(11): 55-61, 72.
- ZHOU Jingru, ZHAO Huaifu, WU Jinhua. Study on Relationship and Evolution Characteristics of Intensive Land-Use and Carbon Emission of Guanzhong Urban Agglomeration[J]. China Land Sciences, 2017, 31(11): 55-61, 72.
- [15] 张俊峰, 张安录, 董捷. 土地集约利用与土地利用碳排放的关系研究: 以武汉城市圈为例 [J]. 农业现代化研究, 2013, 34(6): 717-721.
- ZHANG Junfeng, ZHANG Anlu, DONG Jie. Study on Relationship of Intensive Land Use and Carbon Emission: A Case Study of Wuhan Urban Agglomeration [J]. Research of Agricultural Modernization, 2013, 34(6): 717-721.
- [16] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋, 等. 区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 220-229.
- ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin, ZHONG Taiyang, et al. Carbon Effect Evaluation and Low-Carbon Optimization of Regional Land Use[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17): 220-229.
- [17] 曾永年, 王慧敏. 以低碳为目标的海东市土地利用结构优化方案 [J]. 资源科学, 2015, 37(10): 2010-2017.
- ZENG Yongnian, WANG Huimin. Optimization of Land Use Structure for Low-Carbon Targets in Haidong City, Qinghai Plateau[J]. Resources Science, 2015, 37(10): 2010-2017.
- [18] 赵先超, 马肖迪, 胡艺觉. 基于PSR模型的湖南省土地利用碳排放安全评估 [J]. 福建农业学报, 2018, 33(8): 828-834.
- ZHAO Xianchao, MA Xiaodi, HU Yijue. PSR Model-Based Safety Assessment on Carbon Emission from Land-Use in Hunan [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2018, 33(8): 828-834.
- [19] STAVE K. Participatory System Dynamics Modeling for Sustainable Environmental Management: Observations from Four Cases[J]. Sustainability, 2010, 2(9): 2762-2784.
- [20] 范太胜. 基于系统动力学的低碳经济发展模式研究: 以福建省为例 [J]. 华东经济管理, 2013, 27(8): 12-16.
- FAN Taisheng. Research on Development Pattern of Low-Carbon Economy Based on System Dynamics Model: A Case of Fujian[J]. East China Economic Management, 2013, 27(8): 12-16.
- [21] 涂国平, 贾仁安. 红壤丘陵区生态系统反馈结构研究 [J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 84-87.
- TU Guoping, JIA Ren'an. Study on the Feedback Structure on Ecosystem in Intervale Region of South China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(4): 84-87.
- [22] 佚名. 《湖南省国民经济和社会发展第十三个五年(2016—2020)规划纲要》[EB/OL]. [2019-02-20]. <https://max.book118.com/html/2018/0310/156665257.shtm>.
- Anon. *The Outline of the Thirteenth Five-Year Plan for the National Economic and Social Development of Hunan Province (2016—2020)*[EB/OL]. [2019-02-20]. <https://max.book118.com/html/2018/0310/156665257.shtm>.
- [23] 赵荣钦, 刘英, 丁明磊, 等. 河南省农田生态系统碳源/汇研究 [J]. 河南农业科学, 2010, 39(7): 40-44.
- ZHAO Rongqin, LIU Ying, DING Minglei, et al. Research on Carbon Source and Sink of Farmland Ecosystem in Henan Province[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2010, 39(7): 40-44.
- [24] 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 Kongqing. Evaluation and Structural Optimization of Low-Carbon Economy-Oriented Regional Land-Use[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [25] 吴萌. 武汉市土地利用碳排放分析与系统动力学仿真 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- WU Meng. Analytical and System Dynamics Simulation of Land Use Carbon Emission in Wuhan City[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [26] 王曦溪, 李振山. 1998—2008年我国废水污水处理的碳排放量估算 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(7): 1764-1776.
- WANG Xixi, LI Zhenshan. Estimation of Carbon Emissions from Wastewater Treatment from 1998 to 2008 in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(7): 1764-1776.

(责任编辑: 廖友媛)