

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.06.008

基于系统动力学的湖南省能源消耗碳排放仿真模拟

彭竞霄, 袁超, 高明惠, 赵先超

(湖南工业大学 城市与环境学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 基于系统动力学原理与方法, 利用 Vensim-PLE 软件对湖南省的能源消耗碳排放进行了模型构建与仿真研究。通过设置 5 种情景方案, 动态模拟了 2017—2030 年湖南省能源消耗碳排放发展演变趋势, 以探究经济快速发展、能源结构改善、产业结构优化对未来湖南省能源碳排放的影响。研究表明: 按照目前的发展趋势, 湖南省能源消耗碳排放总量将继续保持逐年增长的演变趋势, 到 2030 年, 湖南省能源消耗碳排放量将达到 $14\ 174.4 \times 10^4$ t, 约为 2017 年的 1.47 倍。经济的快速发展对湖南省能源消耗碳排放的增加有着重要的影响, 降低煤炭能源消耗和调整第二产业向第三产业转变, 能够有效减少湖南省能源消耗碳排放量。在初始自然增长、经济快速发展、能源结构调整、产业结构调整、综合调控调整 5 种情景方案下, 到 2030 年时, 碳排放量较 2017 年分别上升 47.3%, 57.7%, 40.4%, 27.7%, 21.9%。从 5 种情景方案模拟的能源消耗碳排放峰值来看, 产业结构调整方案于 2029 年达到峰值, 综合调控调整方案于 2027 年达到峰值。

关键词: 系统动力学; 能源消耗; 碳排放; 湖南省

中图分类号: F127; F205

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)06-0051-09

引文格式: 彭竞霄, 袁超, 高明惠, 等. 基于系统动力学的湖南省能源消耗碳排放仿真模拟 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(6): 51-59.

Simulation of Energy Consumption and Carbon Emissions in Hunan Province Based on System Dynamics

PENG Jingxiao, YUAN Chao, GAO Minghui, ZHAO Xianchao

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

Abstract: Based on the principle and method of system dynamics, Vensim-PLE software is used to establish and simulate the model of energy consumption and carbon emissions in Hunan Province. With five scenarios set up, a dynamic simulation has been made of the evolution trend of energy consumption and carbon emissions in Hunan Province from 2017 to 2030, so as to explore the impact of the rapid economic development, improvement of energy structure and optimization of industrial structure on energy and carbon emissions in Hunan Province in the future. The results show that, according to the current development trend, the total amount of energy consumption and carbon emissions in Hunan Province will continue to grow year by year. By the year 2030, the total amount of energy consumption and carbon emissions in Hunan Province will reach to $14\ 174.4 \times 10^4$ t, which is about 1.47 times of that

收稿日期: 2019-03-30

基金项目: 教育部人文社会科学规划基金资助项目 (17YJCZH258), 国家统计局科学研究基金资助重点项目 (2019LZ27) 湖南省社会科学基金资助项目 (17JD25), 湖南省社会科学成果评审委员会课题基金资助项目 (XSP19YBZ142), 湖南省研究生科研创新基金资助项目 (CX2018B738)

作者简介: 彭竞霄 (1996-), 女, 湖南湘潭人, 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: 1398621436@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, 硕士生导师, 主要研究方向为资源开发与区域可持续发展, E-mail: zhaoxianchao1983@163.com

amount in 2017. The rapid economic development has a significant impact on the increase of energy consumption and carbon emissions in Hunan Province, with the reduction of coal energy consumption and adjustment of the transition from the secondary industry to the tertiary industry to effectively reduce energy consumption and carbon emissions in Hunan Province. Under the five scenarios of initial natural growth, rapid economic development, energy structure adjustment, industrial structure adjustment, comprehensive regulation and adjustment, carbon emissions will increase by 47.3%, 57.7%, 40.4%, 27.7% and 21.9% respectively by 2030, compared with statistics in 2017. According to the statistics of energy consumption and carbon emissions simulated by the five scenarios, the industrial structure adjustment scheme will reach its peak in 2029 and the comprehensive regulation and adjustment scheme will reach its peak in 2027.

Keywords: system dynamics; energy consumption; carbon emission; Hunan Province

1 研究背景

全球气候变暖问题是人类可持续发展面临的重大挑战之一,更是人们密切关注的热点问题之一。近年来,国际社会对主要由能源消耗(化石燃料燃烧)引起的温室气体排放和所带来的气候变化问题也越来越关注,并陆续制订了一系列公约、协定,如1992年的《联合国气候变化框架公约》、1997年的《京都议定书》、2007年的《巴厘岛路线图》、2009年的《哥本哈根协议》、2016年的《巴黎协定》和2018年的《世界环境公约》等。

当前全球气候变暖形势日益严峻,而能源消耗是导致全球气候变暖的二氧化碳排放的主要来源。研究表明,世界化石燃料能源消耗所产生的二氧化碳排放量占二氧化碳排放总量的80%~90%^[1]。从这个层面来看,计算化石燃料消耗产生的碳排放可以较为准确地估算区域碳排放量。近年来,国内外学者围绕碳排放问题展开了深入、系统的研究,检索相关研究文献发现,目前已有不少学者对能源消耗与碳排放进行了相关研究。例如:杨子晖^[2]对中国经济增长、能源消费与二氧化碳排放的动态关系展开了深入研究;荣培君等^[3]构建了省域能源消耗碳排放安全评价指标体系,并分析了中国能源消耗碳排放安全时空分异,并运用GM(1,1)方法对其进行了预测;帅通等^[4]研究了上海市能源消耗结构以及产业结构的变动对其碳排放产生的影响。综合来看,现有研究大多是针对碳排放系统与影响碳排放要素之间的关系进行实证分析,一定程度上忽略了碳排放系统是一个动态复杂的系统。正是在这种背景下,系统动力学方法在被广泛应用于城市社会经济问题研究后^[5],又逐渐被应用于碳排放研究领域。

近年来,国内已有部分学者运用系统动力学方法对北京、天津^[6]、长江三角洲等地的碳排放情况进行

了实证分析。例如:唐德才等^[7]对长三角地区的能源消耗碳排放进行了系统动力学(system dynamic, SD)模型的建模与仿真,并针对性地提出了相应的节能减排建议;刘伟等^[8]构建了低碳城市发展规划系统动力学模型模拟预测北京低碳城市发展状况。此外,也有学者运用系统动力学方法对低碳交通^[9-10]、居民居住^[11]、低碳经济^[12]、土地利用^[13]、碳排放交易政策^[14]等某一专题开展了相应的研究工作。

近年来,湖南省经济取得了快速的发展,能源消耗量大幅增长,二氧化碳排放量也随之大幅增长。从与湖南省碳排放主题相关的研究成果看,赵先超等^[15]测算并分析了湖南省不同土地利用方式的碳排放效应及时空差异;何介南等^[16]估算了湖南省化石燃料的消耗量和工业过程中的碳排放量;余光英等^[17]对湖南省历年碳排放结构、总量变化特征和不同土地利用类型下碳排放强度与结构特征进行了研究。

综合来看,已有部分学者结合湖南省实际开展了能源消耗碳排放相关研究。但是从已有研究内容来看,现有成果较注重对碳排放空间差异、影响因素等内容的研究;从研究方法来看,多采用对数平均D氏指数(logarithmic mean divisia index, LMDI)模型的方法,鲜有学者运用系统动力学方法来深入刻画未来碳排放增长演变规律与趋势。而从系统动力学模型本身来看,该模型可以有效地动态模拟碳排放系统的运行机制,通过情景方案的设置可以较科学地描述区域能源消耗碳排放动态增长趋势。因此,本文拟以此为切入点,以湖南省为研究对象,运用系统动力学原理与方法,以及Vensim-PLE软件,综合考虑人口、经济、产业结构、能源结构、碳汇等因素,探讨能源消耗与社会、经济之间的内在联系,对其能源消耗碳排放状况进行动态仿真模拟,并且通过调整系统内部的关键参数,预测湖南省较长一段时期内的

能源需求和碳排放变化趋势,为“十三五”及远期湖南省低碳转型发展以及节能减排提供一定的理论、数据与政策参考。

2 研究区域概况

湖南省是我国中部六省之一,地处东经 $108^{\circ} 47' \sim 114^{\circ} 15'$,北纬 $24^{\circ} 38' \sim 30^{\circ} 08'$,东临江西,西接重庆、贵州,南毗广东、广西,北连湖北。2017年,湖南省实现地区生产总值 $34\,590.56 \times 10^8$ 元,较上一年增长8%,其中第一产业产值 $3\,689.96 \times 10^8$ 元,第二产业产值 $14\,145.49 \times 10^8$ 元,第三产业产值为 $16\,755.11 \times 10^8$ 元,三产比值为10.7:40.9:48.4;能源消耗总量合计 $16\,171.24 \times 10^4$ t标准煤,较上一年约增加 367×10^4 t,其中煤品燃料占62.59%,较上一年约增加3.83%,油品燃料占16.26%,较上一年约降低0.43%,天然气占2.22%,较上一年约降低0.16%,人均生活性能耗为0.331t标准煤/人,单位GDP能耗为0.702t标准煤/万元。截至2017年末,全省户籍人口数为 $7\,296.26 \times 10^4$ 人,较上年减少 22.55×10^4 人,约降低0.31%。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

湖南省能源消耗碳排放动态仿真模拟研究所涉及的能源数据来源于《中国能源统计年鉴》,包括2010—2017年的湖南省煤炭、焦炭、原油、天然气等能源消耗数据;其他数据如人口、GDP、林业面积等数据均来源于《湖南省统计年鉴》。

表1 湖南省2010—2017年能源消耗碳排放量数据

Table 1 Statistics of energy consumption and carbon emissions in Hunan province from 2010 to 2016 10^4 t

年份	煤炭	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	碳排放总量
2010	6 113.91	904.62	491.66	213.79	25.43	433.95	66.46	70.83	8 320.65
2011	7 022.32	707.34	640.96	240.42	26.93	484.63	60.95	91.45	9 274.99
2012	6 524.63	890.45	774.81	316.92	29.61	432.77	54.10	112.02	9 135.33
2013	6 060.19	893.52	792.00	354.11	32.66	488.59	60.36	122.01	8 803.43
2014	5 885.07	864.01	670.25	372.23	34.79	516.93	59.85	145.47	8 548.60
2015	6 016.15	951.02	735.04	419.37	43.52	592.36	82.00	158.07	8 997.51
2016	6 178.81	797.74	704.19	469.16	46.61	615.11	83.10	168.85	9 063.59
2017	6 695.23	787.00	644.38	523.17	51.08	548.84	82.70	156.45	9 488.85

从湖南省能源消耗碳排放总量增长来看,2010—2017年,能源消耗碳排放总量呈现出一定程度的波动增长趋势,从2010年的 $8\,320.65 \times 10^4$ t增长到2017年的 $9\,488.85 \times 10^4$ t,净增加 $1\,168.20 \times 10^4$ t,累计增长率14.04%。从各类能源消耗碳排放占比来看,2017年煤炭、焦炭、原油和天然气的能源消费分别占能源消费总量的76.68%,5.86%,4.76%,1.62%,

3.2 研究方法

对于湖南省能源消耗碳排放的测算,主要是基于联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)《国家温室气体排放清单指南》^[18]中提供的能源消耗碳排放计算公式(1)展开。

$$C = \sum_{i=1}^9 C_i = \sum_{i=1}^9 E_i \delta_i, \quad (1)$$

式中: C 为碳排放量;

E_i 为第*i*类能源的消耗量;

δ_i 为第*i*类能源的碳排放系数。

首先,根据《中国能源统计年鉴》中的分类法,将能源消耗分为煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气及电力等9类;然后,根据《中国能源统计年鉴》和《湖南省统计年鉴》提供的各类能源消耗数据与各类能源折标准煤对应参考系数,将湖南省2010—2017年各类能源折合成标准煤;其次,根据能源碳排放系数,计算得出湖南省2010—2017年各能源消耗类型碳排放量;最后,将各能源消耗类型的碳排放量累积相加,得到湖南省历年能源消耗碳排放量。

4 结果与分析

4.1 碳排放测算与特征分析

根据能源消耗碳排放测算公式,并结合相关数据,测算得出湖南省2010—2017年各能源消耗碳排放量数据,如表1所示。

其碳排放量分别占碳排放总量的70.56%,8.29%,6.79%,1.65%。相较于2010年,煤品燃料的消耗比例缓慢降低,油品燃料与天然气的消耗比例逐渐升高。

4.2 湖南省能源消耗碳排放的SD模拟模型构建

运用系统动力学原理与方法,构建能源消耗碳排放因果回路(流程)图和存量流程图,是对湖南省能源消耗碳排放动态仿真模拟进行研究的重要环节。

能源消耗碳排放系统是一个涉及社会、经济、环境的复杂动态系统。根据因果回路图及其系统结构、反馈机制和反馈回路,可分析人口、经济、产业结构、能源结构、碳汇等对能源消耗碳排放的影响。通过查询《中国能源统计年鉴》和《湖南省统计年鉴》,并采用表函数法、线性回归法、经验公式法、逻辑函数等确定模型的参数值,并将其代入湖南省能源消耗碳排放系统的相关方程,从而建立碳排放系统动力学流程图。

运用 Vensim-PLE 软件,不断调整修正湖南省能源消耗碳排放系统动力学模型,使模拟结果接近湖南省能源消耗碳排放现状。模型中共有 72 个量,主要包括常住人口、GDP、林业面积等 3 个状态变量;人口自然增长率、生态环境治理因子、人口变化量、GDP 增长量、造林面积增加量和碳排放强度的差等 6 个速率变量;生活性能源消耗量、科技收入、碳强度、能源消耗总量、碳排放量等 48 个辅助变量;其他均为常量。模型中主要方程如下:

$$GDP = \text{integ}(GDP \text{ 增长量}, 16\ 153.2), \quad (2)$$

$$\text{生态环境治理因子} = \text{碳排放强度的差} / \text{碳强度}, \quad (3)$$

$$\text{生活性能源消耗量} = \text{人口} \times \text{人均生活性能源消耗}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{能源消耗总量} = & \text{生产性能源消耗量} + \\ & \text{生活性能源消耗量}, \quad (5) \end{aligned}$$

表 2 2010—2017 年湖南省能源消耗及其碳排放主要变量历史检验结果

Table 2 Historical test results of main variables of energy consumption and carbon emissions in Hunan Province from 2010 to 2017

年份	GDP			能源消耗总量			碳排放总量		
	实际值/(10 ⁸ 元)	仿真值/(10 ⁸ 元)	误差率/%	实际值/(10 ⁴ t)	仿真值/(10 ⁴ t)	误差率/%	实际值/(10 ⁴ t)	仿真值/(10 ⁴ t)	误差率/%
2010	16 153.3	16 153.2	0.00	14 880.1	14 862.6	-0.12	8 320.65	8 803.9	5.81
2011	19 816.6	18 511.6	-6.59	16 160.9	16 129.3	-0.20	9 274.99	9 739.2	5.00
2012	22 338.3	20 881.0	-6.52	16 744.1	15 987.9	-4.52	9 135.33	9 285.8	1.65
2013	24 834.7	23 240.6	-6.42	14 918.5	15 325.6	2.73	8 803.43	9 510.0	8.03
2014	27 281.8	25 587.9	-6.21	15 316.8	14 729.7	-3.83	8 548.60	8 715.7	1.95
2015	29 172.2	28 018.8	-3.95	15 468.6	15 234.8	-1.51	8 997.51	9 216.5	2.43
2016	31 551.4	30 400.4	-3.65	15 804.0	15 532.0	-1.72	9 063.59	9 251.4	2.07
2017	34 590.6	32 832.4	-5.08	16 171.2	16 152.6	-0.12	9 488.85	9 621.0	1.39

为研究参数值在合理范围内变化对模型影响的灵敏度,探索数值变化对系统的影响程度,建立式(7)所示关于灵敏度的分析表达式。

$$S(t) = \frac{\Delta Y(t)}{\Delta X(t)}, \quad (7)$$

式中: S 为灵敏度;

Y 为输出变量;

X 为输入变量;

t 为变量类型。

碳排放强度的差 =

$$\max(\text{碳强度} - \text{碳排放强度目标值}, 0)。 \quad (6)$$

4.3 湖南省能源消耗碳排放的 SD 模型检验

湖南省能源消耗碳排放动态仿真模拟模型建立后,应对模型进行直观与运行检验、历史仿真检验和灵敏度分析检验,以判断模型的合理性、真实性、稳定性以及有效性^[13]。

使用 Vensim-PLE 软件自带的方程检验功能对模型合理性进行直观与运行检验。检验、测试结果显示,该模型未出现错误提示,且模型试运行未产生病态结果。因此,本文所构建的湖南省能源消耗碳排放仿真模拟模型是合理的。

模型构建完成之后往往达不到理想的精度,通常需经过历史仿真检验,精度在 $\pm 15\%$ 内可认为模型有效^[19]。将 2010—2017 年的历史统计数据代入模型进行模拟验证,选取 GDP、能源消耗总量和碳排放总量作为检验变量,将模型测算出的模拟值与历史数据进行误差计算,结果如表 2 所示。表 2 的结果表明:3 个指标的相对误差率都在 $\pm 10\%$ 以内,模型通过有效性检验。这说明湖南省能源消耗碳排放系统动力学模型的模拟结果可靠,能通过调节关键参数进行仿真模拟实验,且可以用来模拟湖南省能源消耗碳排放的状态以及变化趋势。

选取 14 个变量进行分析,增加参数 10% 的变化量,模拟得出湖南省能源消耗碳排放量的变化。14 个变量及序号依次如下:1. 人口自然增长率、2. GDP 增长率、3. 第一产业比例、4. 第二产业比例、5. 第三产业比例、6. 人均生活能耗、7. 煤炭能源消耗比例、8. 原油能源消耗比例、9. 焦炭能源消耗比例、10. 煤油能源消耗比例、11. 汽油能源消耗比例、12. 柴油能源消耗比例、13. 燃料油能源消耗比例、14. 天然气能源消耗比例。将两点之间的斜率作为变量的灵敏度,用

式(7)计算得出14个变量的灵敏度,结果如图3所示。

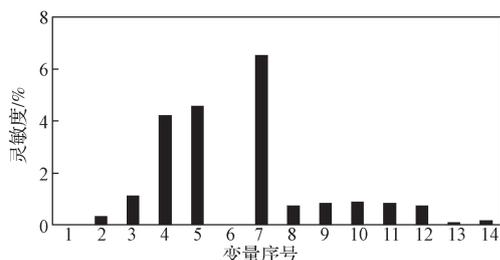


图3 湖南省能源消耗碳排放系统动力学模型参数灵敏性分析结果

Fig. 3 Sensitivity analysis of dynamic model parameters of energy consumption and carbon emissions system in Hunan Province

由图3可知,灵敏度都在合理范围之内,第二产业比例、第三产业比例和煤炭能源消耗的灵敏度均较高,分别为4.23%、4.60%、6.54%,远高于其它参数,说明这3个参数是比较重要的因素。此外,第一产业比例、原油能源消耗比例、焦炭能源消耗比例、煤油能源消耗比例、汽油能源消耗比例和柴油能源消耗比例等其他参数的灵敏度小于1.2%,灵敏度较低,表明系统对绝大多数参数的变化并不敏感,也表明模型拥有较好的稳定性,适用于模拟仿真系统。

4.4 情景模拟方案设定与动态仿真模拟

湖南省能源消耗碳排放仿真模拟模型以2017年为初始仿真年限,以2030年为仿真末年,对湖南省

能源消耗碳排放进行仿真模拟分析。主要变量的初始值采取拟合历史数据获得,部分变量的变化率参考4.3节灵敏度分析结果和湖南省“十三五”节能减排综合工作方案等相关政策规划确定。选取GDP增长率、能源结构、产业结构3个变量作为调控变量,通过调整这些变量,建立了5种仿真模拟方案,如表3所示。

表3 湖南省能源消耗碳排放政策模拟方案

Table 3 Energy consumption and carbon emissions policy simulation program in Hunan Province

方案序号	方案特点	模型调整内容
方案一	初始自然增长	使用模型原始数据,各决策变量指标值维持现有发展趋势
方案二	经济快速发展	控制经济发展速度,到2030年,提高GDP增长率到6%
方案三	能源结构调整	调整能源结构比例,到2030年,降低煤炭能源消耗比至48%,提高天然气消耗比至6%,提高非化石能源消耗比至16%
方案四	产业结构调整	调整产业结构,到2030年,第一、二产业向第三产业逐渐转移,降低第一产业2%,降低第二产业6%,提升第三产业8%
方案五	综合调控调整	同时调控调整经济、能源结构和产业结构,到2030年,GDP增长率为6%,煤炭能源消耗比为48%,天然气消耗比为6%,非化石能源消耗比为16%,降低第一产业2%,降低第二产业6%,提升第三产业8%

按照表3设定的5种情景方案进行仿真模拟后,得到其具体模拟值结果,如表4所示。

表4 5种方案情景模拟结果

Table 4 Scenario simulation results under five scenarios

年份	能源消耗总量/(10 ⁴ t)					碳排放量/(10 ⁴ t)				
	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
2017	16 152.6	16 152.6	16 152.6	16 152.6	16 152.6	9 621.0	9 621.0	9 621.0	9 621.0	9 621.0
2018	16 835.0	16 851.8	16 835.0	16 612.9	16 835.0	10 027.5	10 037.5	9 920.7	9 895.2	9 960.3
2019	17 455.9	17 503.4	17 455.9	17 054.9	17 455.9	10 397.3	10 425.6	10 255.2	10 158.5	10 292.8
2020	18 006.2	18 139.1	18 006.2	17 399.6	18 006.2	10 725.1	10 804.2	10 546.1	10 363.8	10 581.4
2021	18 790.6	19 012.2	18 790.6	18 052.7	18 656.3	11 192.3	11 324.3	10 971.7	10 752.8	10 926.2
2022	19 545.1	19 860.4	19 545.1	18 653.5	19 263.5	11 641.7	11 829.5	11 377.1	11 110.6	11 243.4
2023	20 263.0	20 673.4	20 263.0	19 192.7	19 815.2	12 069.3	12 313.8	11 758.5	11 431.8	11 525.8
2024	20 925.3	21 372.5	20 925.3	19 661.9	20 297.0	12 463.8	12 730.2	12 105.2	11 711.3	11 765.6
2025	21 482.5	21 985.3	21 482.5	20 053.3	20 692.8	12 795.7	13 095.2	12 388.9	11 944.3	11 953.7
2026	21 976.9	22 458.7	21 976.9	20 359.6	20 984.5	13 090.1	13 377.2	12 634.4	12 126.4	12 080.3
2027	22 366.8	23 026.8	22 366.8	20 574.5	21 151.7	13 322.4	13 715.5	12 818.3	12 254.8	12 134.4
2028	22 726.5	23 773.8	22 726.5	20 693.1	21 171.8	13 536.7	14 160.5	12 983.6	12 325.9	12 103.7
2029	23 260.3	24 414.2	23 260.3	20 711.4	21 019.6	13 854.6	14 541.9	13 246.7	12 336.4	11 974.8
2030	23 797.6	25 467.6	23 797.6	20 627.4	20 667.2	14 174.6	15 169.3	13 509.9	12 286.4	11 732.8

从总体上看,这5种方案的能源消耗碳排放量增长趋势逐年变缓,如图4和图5所示。其中:

方案一假设模型在现状人口经济自然发展下,各决策指标变量值维持现有发展趋势进行模拟,其能源消耗总量从2017年的 $16 152.6 \times 10^4$ t增长到2030年的 $23 797.6 \times 10^4$ t,碳排放量从2017年的 $9 621.0 \times$

10^4 t增长到2030年的 $14 174.6 \times 10^4$ t,碳排放量年均增长率为3.03%。

方案二通过经济的快速发展模拟,2030年的能源消耗总量为 $25 467.6 \times 10^4$ t,年均增长率为3.57%;碳排放量为 $15 169.3 \times 10^4$ t,年均增长率也为3.57%。

方案三突出能源结构调整的碳减排效应,以便对

今后湖南省能源结构调整做出合理判断与解释, 模拟得到2030年的能源消耗总量为 $23\ 797.6 \times 10^4$ t, 年均增长率为3.03%; 碳排放量为 $13\ 509.9 \times 10^4$ t, 年均增长率为2.65%。

方案四则突出产业结构调整的碳减排效应, 模拟得到能源消耗总量和碳排放量将在2029年达到峰值, 2018—2029年期间均以2.1%的年均增长率缓慢增长。到2029年碳排放量达到 $12\ 336.4 \times 10^4$ t, 能源消耗总量达到 $20\ 711.4 \times 10^4$ t, 之后湖南省能源消耗总量和碳排放量将缓慢降低, 预计到2030年碳排放量为 $12\ 286.4 \times 10^4$ t, 能源消耗总量为 $20\ 627.4 \times 10^4$ t。

方案五在方案二、三、四的基础上, 综合考虑经济、能源和产业对碳排放量的影响, 对湖南省能源碳排放量进行综合优化调控, 模拟得到能源消耗总量在2028年达到峰值, 为 $21\ 171.8 \times 10^4$ t, 碳排放量在2027年达到 $12\ 134.4 \times 10^4$ t的峰值, 之后缓慢下降, 2030年分别为 $20\ 667.2 \times 10^4$ t和 $11\ 732.8 \times 10^4$ t。

净碳排放量的总体变化趋势与碳排放量的相似。由于低碳技术的进步和造林面积的增加, 所产生的减排效应逐渐增强, 导致净碳排放量减少。其中方案四的净碳排放量峰值提前到2027年出现, 预计为 $9\ 215 \times 10^4$ t, 方案五的净碳排放量峰值提前到2025年出现, 预计为 $9\ 153.5 \times 10^4$ t。

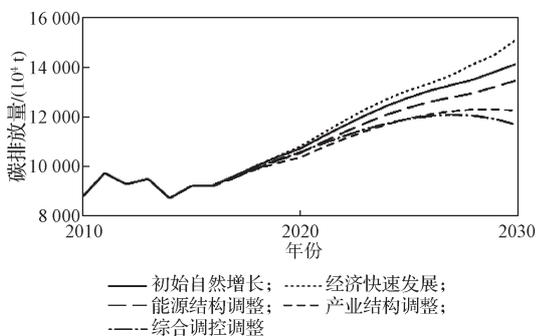


图4 湖南省碳排放量不同情景模拟结果

Fig. 4 Simulation results under different scenarios of carbon emissions in Hunan Province

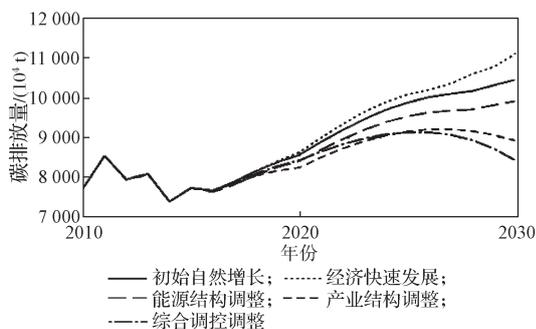


图5 湖南省净碳排放量不同情景模拟结果

Fig. 5 Simulation results of net carbon emissions under different scenarios in Hunan Province

对比湖南省能源消耗碳排放5种情景模拟方案, 可知:

1) 经济增长是促进湖南省能源消耗碳排放总量增长的重要因素。数据表明, 社会经济发展与碳排放呈显著正相关, 经济的增长也将促进碳排放总量增长。然而, 目前湖南省处于经济快速发展阶段, 湖南省的发展重心仍将是保持国民经济的快速增长, 而经济的快速增长也将导致碳排放量的快速增长, 这也表明在未来的一段时间内湖南省的碳减排任务仍将十分艰巨。

2) 调整能源消耗结构, 控制煤炭、石油等能源消耗向非化石能源转变, 是抑制湖南省能源消耗碳排放量的主要途径。能源的合理消耗与结构优化可以减缓碳排放量和大气污染, 而传统化石能源如煤炭消耗产生的碳排放往往占比较高, 因此提升天然气等清洁能源的消耗所占比例, 降低煤炭、石油等传统能源的消耗比例, 可有效减缓能源消耗碳排放量的增加。

3) 产业结构调整对降低湖南省能源消耗碳排放有着至关重要的作用。第二产业对煤炭、原油等化石能源的需求量相比第三产业更多, 其能源消耗量和碳排放量也更大。因此, 在不降低湖南经济发展, 保证人民生活水平的前提下, 应当加快调整产业结构, 引导湖南地区产业重心向第三产业转移, 逐步减少第二产业特别是传统高耗能产业的比例, 从而达到有效降低碳排放的目的。

5 结论与展望

本文基于系统动力学原理与方法, 利用 Vensim-PLI 软件对湖南省能源消耗碳排放进行了建模与仿真, 通过5种情景方案的设置, 动态模拟了2017—2030年湖南省能源消耗碳排放发展演变趋势, 可得如下主要结论:

1) 基于系统动力学模型测试结果可知, 将系统动力学模型用于湖南省能源消耗碳排放动态仿真模拟是可行的, 此模型也适用于其他地区相应问题的研究。

2) 灵敏性分析结果表明, 能源和产业经济因素对湖南省能源消耗和碳排放具有显著的影响作用。煤炭能源消耗增长10%会导致碳排放增长6.54%, 而相同比例第二、三产业的增加则会产生4.23%和4.60%碳排放量的增加。此外, GDP增长10%将会导致0.35%的碳排放量的增加。

3) 若系统未发生任何显著性变化, 即如果按照目前的发展趋势, 则湖南省能源消耗碳排放总量将保持逐年攀升的趋势, 在2030年将达到 $14\ 174.6 \times 10^4$ t,

约为2017年碳排放量的1.473倍,年均增长率为3.03%。5种方案情景下,2030年碳排放量分别较2017年上升了47.3%,57.7%,40.4%,27.7%,21.9%,产业结构调整方案于2029年达到峰值,综合调控调整方案于2027年达到峰值。

4)5种方案模拟结果表明,经济的快速发展对能源消耗碳排放量的增加具有较大的影响作用。调整能源消耗结构与产业比例结构都能够有效减少湖南省能源消耗碳排放量,其中,调整煤炭能源比例结构,以及调整第二产业与第三产业比例结构的作用效果相对更加显著。综合调控情景更符合现实情况,在综合调控下,能在保障经济发展的同时有效提前碳排放峰值时间,降低二氧化碳排放量。因此,政府应大力推广清洁能源,通过政策调控产业结构,改变以原煤消耗和以第二产业为主的传统发展模式,加大低碳城市建设力度,实行可持续发展模式,能有效提前碳排放峰值时间,较好地实现碳减排目标。

本文对湖南省能源消耗碳排放系统进行了仿真建模以及政策模拟,能较好地刻画湖南省能源消耗碳排放演变过程与规律,有助于制订科学有效的碳排放调控方案。但是在选取系统动力学模型的一些指标,以及确定指标之间的相互关系时,带有一定的主观性。如何进一步结合其它方法优化模型,以便更好地模拟能源消耗碳排放系统,还有待进一步深入研究。能源消耗碳排放仿真模拟研究不是一个研究终点,如何将模拟结果与碳减排技术方法选择更有机地联系起来,也是未来亟待开展的研究工作之一。

参考文献:

- [1] GREEN C. Potential Scale-Related Problems in Estimating the Costs of CO₂ Mitigation Policies[J]. *Climatic Change*, 2000, 44(3): 331-349.
- [2] 杨子晖. 经济增长、能源消费与二氧化碳排放的动态关系研究[J]. *世界经济*, 2011, 34(6): 100-125.
YANG Zihui. Dynamic Relationship Between Economic Growth, Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions[J]. *The Journal of World Economy*, 2011, 34(6): 100-125.
- [3] 荣培君, 杨群涛, 秦耀辰, 等. 中国省域能源消耗碳排放安全评价[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(4): 487-495.
RONG Peijun, YANG Quntao, QIN Yaochen, et al. Energy-Related Carbon Emission Security at the Provincial Level in China[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(4): 487-495.
- [4] 帅通, 袁雯. 上海市产业结构和能源结构的变动对碳排放的影响及应对策略[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(10): 885-889.
SHUAI Tong, YUAN Wen. Effect of the Changes of the Industry Structure and the Energy Structure in Shanghai on Carbon Emission and the Strategies for Response[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(10): 885-889.
- [5] FORRESTER J W. *Urban Dynamics*[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 1969: 52-57.
- [6] 苑清敏, 刘琪, 刘俊. 基于系统动力学的城市碳排放及减排潜力分析: 以天津市为例[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(6): 256-261.
YUAN Qingmin, LIU Qi, LIU Jun. On the Reduced Urban Carbon Emission and an Analysis of such Reduced Emission Potential Based on the Dynamic System by Taking Tianjin as a Case Sample[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(6): 256-261.
- [7] 唐德才, 刘昊, 汤杰新. 长三角地区能源消耗与碳排放的实证研究: 基于系统动力学模型[J]. *华东经济管理*, 2015, 29(9): 63-68.
TANG Decai, LIU Hao, TANG Jiexin. An Empirical Study on Energy Consumption and Carbon Emissions in Yangtze River Delta Region: Based on a System Dynamics Model[J]. *East China Economic Management*, 2015, 29(9): 63-68.
- [8] 刘伟, 陈超凡, 桓汉青, 等. 基于系统动力学模型的低碳城市发展研究[J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(4): 86-91.
LIU Wei, CHEN Chaofan, HUAN Hanqing, et al. Research on Low-Carbon City Development Based on System Dynamics Model[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, 36(4): 86-91.
- [9] 张建慧, 雷星晖, 李金良. 基于系统动力学城市低碳交通发展模式研究: 以郑州市为例[J]. *软科学*, 2012, 26(4): 77-81.
ZHANG Jianhui, LEI Xinghui, LI Jinliang. Research on Building Urban Low-Carbon Transportation System Based on System Dynamics: Taking Zhengzhou as an Example[J]. *Soft Science*, 2012, 26(4): 77-81.
- [10] 钟莲, 李莉, 宋阳. 基于系统动力学的城市低碳交通情景模拟研究: 以乌鲁木齐为例[J]. *物流科技*, 2015, 38(4): 67-69.
ZHONG Lian, LI Li, SONG Yang. Research on the City Low Carbon Transportation Scenario Simulation by System Dynamics: Taking Urumqi as an Example[J]. *Logistics Sci-Tech*, 2015, 38(4): 67-69.
- [11] 庞婕, 焦建玲, 李兰兰. 我国居民居住碳排放系统动力学分析[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(2): 260-265.
PANG Jie, JIAO Jianling, LI Lanlan. Analysis

- of Household Carbon Emissions in China by System Dynamics[J]. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*, 2017, 40(2): 260-265.
- [12] 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.
- [13] 吴萌, 任立, 陈银蓉. 城市土地利用碳排放系统动力学仿真研究: 以武汉市为例 [J]. *中国土地科学*, 2017, 31(2): 29-39.
WU Meng, REN Li, CHEN Yinrong. Simulation of Urban Land Use Carbon Emission System Based on a System Dynamic Model: Take Wuhan as an Example[J]. *China Land Science*, 2017, 31(2): 29-39.
- [14] 张俊荣, 王孜丹, 汤铃, 等. 基于系统动力学的京津冀碳排放交易政策影响研究 [J]. *中国管理科学*, 2016, 24(3): 1-8.
ZHANG Junrong, WANG Zidan, TANG Ling, et al. The Simulation of Carbon Emission Trading System in Beijing-Tianjin-Hebei Region: An Analysis Based on System Dynamics[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(3): 1-8.
- [15] 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.
- [16] 何介南, 康文星. 湖南省化石燃料和工业过程碳排放的估算 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2008, 28(5): 52-58.
HE Jienan, KANG Wenxing. Estimation of Carbon Emissions from Fossil Fuel and Industrial Production from 2000 to 2005 in Hunan Province[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2008, 28(5): 52-58.
- [17] 余光英, 员开奇. 湖南省土地利用碳排放动态效率研究: 基于 Malmquist 指数模型 [J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(2): 189-194.
YU Guangying, YUAN Kaiqi. Dynamic Efficiency of Land Use Carbon Emissions in Hunan: Based on Malmquist Index Model[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(2): 189-194.
- [18] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: The AR4 Synthesis Report*[R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007: 48-56.
- [19] 王其藩. *系统动力学* [M]. 2009年修订版. 上海: 上海财经大学出版社, 2009: 219-229.
WANG Qifan. *System Dynamics*[M]. 2009 Rev. ed. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2009: 219-229.

(责任编辑: 邓光辉)