

# 中国碳减排系统的模拟仿真与优化路径

张天敏

郑州大学 河南郑州 450000

**【摘要】**在2030年前碳达峰和2060年前碳中和背景下，构建了包含经济、环境、能源三个子系统的二氧化碳排放系统动力学模型，旨在分析我国二氧化碳排放影响因素和碳减排路径。验证模型有效性之后，通过调控产业结构和能源结构素进行系统情景模拟仿真，结果显示：情景模拟下，产业结构调整能够有效减少碳排放，最后本文根据结论提出了相应政策建议。未来要抓住产业调整的良好机遇，并进一步加强各部门的减排努力，尽早实现碳达峰和碳中和。

**【关键词】**碳达峰；碳减排；系统动力学

## 引言

随着温室气体浓度的增加而引起的全球变暖，已经对自然生态系统和人类生存环境造成了严重影响，如空气污染、气温升高等，二氧化碳是导致全球升温的主要原因<sup>[1]</sup>。在2020年第七十五届联合国大会上，习主席明确宣布，中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取于2060年前实现碳中和，即“碳达峰、碳中和”的“双碳”目标<sup>[2]</sup>。

为实现双碳目标，众多学者做了大量理论与实践研究。比如，Mamipour等<sup>[3]</sup>利用空间杜宾模型，研究了2009—2014年伊朗30个省份人均二氧化碳排放的影响因素。黄蕊等<sup>[4]</sup>利用STIRPAT模型，分析了江苏省能源消费碳排放影响因素及

济、能源结构、科技投入、产业结构等因素，预测中国在2016—2030年的碳排放趋势，为有效促进碳减排提供合理的建议。

## 1 碳减排系统构建及模拟仿真

### 1.1 碳减排系统构建

系统动力学的工作程序图如图1所示。首先是要明确研究的问题；二是界定系统的边界；三是梳理各影响因素之间的因果关系图；四是根据因果关系图构建各个变量之间的结构模型即流图；五是对上述模型进行数理逻辑化以捕捉系统内的相互作用；六是借助计算机软件进行仿真模拟；七是对比模型仿真结果与现实世界的行为与活动，并进行分析优化；最后是根据结论提出的一些政策分析。

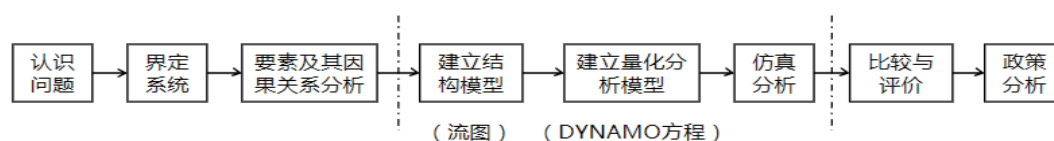


图1 系统动力学工作程序

趋势预测。

系统动力学（System Dynamics, SD）作为一种综合仿真模拟预测模型，能够避免低维度以及单一预测的片面性，适合处理较复杂系统的非线性和长期性问题<sup>[5]</sup>。而碳减排问题是一个涉及经济、能源、社会、政策、环境等多方面的复杂系统<sup>[2]</sup>，因此，本文以全国碳排放为研究对象，通过Vensim软件构建系统动力学模型，综合考虑经

#### 1.1.1 系统因果回路图

对碳排放所涉及的GDP、能源消耗、能源强度、人口、人均能耗、科技投入、产业结构和碳汇等影响因素进行归纳和总结，构建因果关系图。并分为经济、能源、环境三个子系统，经济子系统主要包括GDP、科技投入、三次产业产值及占比等因素；能源子系统主要包括能源消耗量、生活能源消费、净碳排放量等因素；环境子系统主要包括碳

排放量、造林面积增加量、碳汇、固碳量等因素。三个子系统之间存在着制约关系，比如，经济发展可以促进技术进步与创新，从而减少碳排放；经济发展和人口的增长会导致居民生活性能源消费增长，从而加剧环境污染，而环境质量变差会促使政府增加环保投入和增加碳汇，降低碳排放<sup>[6]</sup>。

### 1.1.2 二氧化碳排放流图

根据系统各因果回路反馈机制，构建系统仿真流图。二氧化碳排放系统存量流量图中，本文主要包括3个状态变量（人口规模、GDP和林业面积）、4个速率变量（包括出生人口、死亡人口、GDP增长量和林地增加量）、其余为辅助变量和常量。参照王火根等<sup>[5]</sup>的研究，固碳量为1.6。另外以2009—2020年国家林地面积年均增长率作为研究样本期间林业面积年增长率。

## 1.2 结果分析

本文设定时间边界为2015—2030年间，以2015年为基准年，以2016—2020年的模拟值与实际值对比检验模型有效性，以2023—2030年作为系统政策模拟预测的时间边界。数据主要来源于《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》，《IPCC2006指南》、文献等。

### 1.2.1 模型的检验

选取能源消耗总量、碳排放量两个主要指标，以2015年为基准年，对2016—2020年的数据进行仿真，以模拟值与实际值之间的相对误差来检验模型的有效性，如表1所示。结果显示，误差都在10%以下（均小于15%），因此认为该模型与现实变化趋势基本一致，可以用来仿真调控。

表1 模拟值与实际值对照表

| 时间   | 能源消耗量(万吨标准煤) |        |       | 二氧化碳净排放量(亿吨) |        |       |
|------|--------------|--------|-------|--------------|--------|-------|
|      | 模拟值          | 实际值    | 误差(%) | 模拟值          | 实际值    | 误差(%) |
| 2016 | 417147       | 441492 | 5.51  | 84.38        | 88     | 4.11  |
| 2017 | 447451       | 455827 | 1.84  | 89.96        | 91.49  | 1.67  |
| 2018 | 476285       | 471925 | -0.92 | 94.27        | 94.75  | 0.50  |
| 2019 | 497340       | 487488 | -2.02 | 97.8705      | 97.87  | 0     |
| 2020 | 519929       | 498314 | -4.33 | 101.65       | 101.12 | -0.52 |

### 1.2.2 系统仿真结果

以2015年为基准年，模拟国家2015—2030年碳排放系统的运行情况，并和国家规定的2030年约束值进行比较，如表2所示。

表2 碳达峰目标下模拟值与约束值对照表

| 指标名称         | 约束取值    | 仿真模拟值  |
|--------------|---------|--------|
| GDP碳排放(吨/万元) | <1.2346 | 1.0906 |
| 碳排放峰值(亿吨)    | 120     | 129.04 |

通过对比可知，在初始条件下只有GDP碳排放指标满足约束，而碳排放量并不满足目标，因此为了实现双碳目标，需要探讨合适的减排路径。

### 1.3 系统情景模拟及分析

本文主要从产业结构单因素进行情景模拟。以2021年为初始状态，在三个情景中分别逐渐降低二产占比、增加三产占比，具体参数如表3所示，情景模拟结果如表4所示。

表3 产业结构调整的参数设置

| 参数名称 | 单位 | 时间   | 初始状态 | 情景一  | 情景二  | 情景三  |
|------|----|------|------|------|------|------|
| 一产占比 | %  | 2021 | 7.2  | 7.2  | 7.2  | 7.2  |
|      |    | 2030 | 7.2  | 7.2  | 7.2  | 7.2  |
| 二产占比 | %  | 2021 | 39.3 | 39.3 | 39.3 | 39.3 |
|      |    | 2030 | 39.3 | 37.3 | 35.3 | 30.3 |
| 三产占比 | %  | 2021 | 53.5 | 53.5 | 53.5 | 53.5 |
|      |    | 2030 | 53.5 | 55.5 | 57.5 | 62.5 |

表4 产业结构调整下碳排放和碳强度

| 项目          | 时间   | 初始状态    | 情景一     |        | 情景二     |        | 情景三     |        |
|-------------|------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|             |      |         | 模拟值     | 对比初始值  | 模拟值     | 对比初始值  | 模拟值     | 对比初始值  |
| 净碳排放量(亿吨)   | 2023 | 109.817 | 108.996 | -0.821 | 108.174 | -1.643 | 106.119 | -3.698 |
|             | 2030 | 126.823 | 122.517 | -4.306 | 118.21  | -8.613 | 107.443 | -19.38 |
| 碳排放强度(吨/万元) | 2023 | 1.081   | 1.073   | -0.008 | 1.065   | -0.016 | 1.045   | -0.036 |
|             | 2030 | 1.072   | 1.036   | -0.036 | 0.999   | -0.073 | 0.908   | -0.164 |

由表4可知，对比初始状态，随着时间推移，产业结构调整程度的逐步变大，情景二和情景三下的净碳排放量达

到约束目标,碳排放强度均在约束目标之内。但值得注意的是,以上调整是理想状态下的数值,即在能源结构、科技投入比例等条件不变的前提下,提高第三产业比例可以降低碳排放量从而降低碳排放强度。

## 2 结论与建议

### 2.1 结论

(1) 初始条件仿真结果表明,中国二氧化碳净排放量逐年增长,在2030年将达到129.04亿吨,并且没有达到峰值。

(2) 在设定情景参数模拟中,产业结构的调整很好地促进了我国的碳减排,这与朱勤等<sup>[7]</sup>的研究结果一致,即调整产业结构是我国节能减排的重点策略,要不断优化第三产业在国民经济中所占比例。

### 2.2 建议

根据结论,提出以下建议。一是优化产业结构,大力支持低碳产业发展。逐步提高第三产业比重,降低第二产业比重,严格控制高耗能行业的增长,并推动高耗能、高排放产业向低耗能低排放行业的转型。二是发展低碳技术。我国政府应加大对低碳技术研发的支持,如研发投资税减免、成本补偿等优惠政策,加强传统产业的技术革新和设备更新,提高低碳技术与传统生产、生活和服务业的融合。

## 参考文献:

- [1] 高长春,刘贤赵,李朝奎,等.近20年来中国能源消费碳排放时空格局动态.地理科学进展,2016,35(6):747-757.
- [2] 吕靖烨,贺文慧.晋陕蒙宁地区碳减排系统动力学模型设计与预测研究[J].生态经济,2023,39(01):57-65.
- [3] Mamipour S, Beheshtipour H, Feshari M, et al. Factors influencing carbon dioxide emissions in Iran' s provinces with emphasis on spatial linkages [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(18): 18365-18378.
- [4] 黄蕊,王铮,丁冠群,等.基于STIRPAT模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测[J].地理研究,2016,35(04):781-789.
- [5] 王火根,肖丽香,廖冰.基于系统动力学的中国碳减排路径模拟[J].自然资源学报,2022,37(05):1352-1369.
- [6] Xu S C, He Z X, Long R Y, et al. Factors that influence carbon emissions due to energy consumption based on different stages and sectors in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 115(Mar.1): 139-148.
- [7] 朱勤,彭希哲,陆志明,等.人口与消费对碳排放影响的分析模型与实证[J].中国人口·资源与环境,2010(2):98-102.