

作品名称： 基于 SD 模型的江苏省碳减排
路径优化研究

姓名 欧阳杰

学校 江南大学

年级 2015 级

作品类别 学术论文类

指导教师 王建华 江南大学商学院

摘 要

众所周知，我国近年来GDP飞越的成就与付出的环境代价是分不开的，这一对矛盾体的关系定位直接影响了经济发展与环境保护平衡点的把握。本世纪以来，由于气候变暖与雾霾污染等现实问题的产生，国际社会对于环境保护与节能减排的关注热度前所未有。我国政府在哥本哈根气候大会上承诺到2020年我国单位GDP二氧化碳排放量要比2005年减少40%-45%，这个任务对正处于集中经济发展和转型的中国来说是艰巨的。2017年，碳排放大国——美国宣布退出《巴黎协定》，给原本就如履薄冰的减排共识蒙上了一层阴影。可以看出，碳减排的政策设定阈值与经济发展目标相契合是很重要的。

江苏省作为我国经济大省，其减排行动的落实对于整个国家减排目标的实现具有举足轻重的地位。在本文中，基于Vensim软件的江苏碳排放系统动力学模型被运用于预测未来5年江苏省碳排放总量与能源消耗量的趋势。结果表明，在基准情景下江苏省2025年的碳排放量将达到546.7百万吨二氧化碳当量，是2015年的1.20倍；与此同时，能源需求量将上升为2015年的1.21倍，接近59710万吨。江苏Vensim碳排放模型的情景分析证明了碳减排政策的实施对未来预期碳排放量的影响是显著的，碳交易市场子系统的引入对于降低碳排放经济负外部性的作用是明显的。所有的分析结果清楚地勾勒了江苏省未来能源需求与碳排放轮廓。

关键词：碳减排；碳排放；SD 模型；情景分析；江苏

ABSTRACT

As we all know, China's achievements in GDP growth in recent years cannot be separated from the environmental costs it has paid. This contradictory relationship directly affects the balance between economic development and environmental protection. Since the beginning of this century, due to the emergence of practical problems such as climate warming and haze pollution, the international community has paid unprecedented attention to environmental protection, energy conservation and emission reduction. At the Copenhagen climate conference, our government promised to reduce CO₂ emissions per unit of GDP by 40% to 45% by 2020 compared with 2005, which is a difficult task for China as it is concentrating on economic development and social transformation. In 2017, the United States, a major carbon emitter, pulled out of the Paris agreement, casting a shadow over an already fragile consensus to cut emissions. It can be seen that it is very important to set policy thresholds for CO₂ emission reduction in line with economic development goals.

As a major economic province in China, the implementation of emission reduction actions of Jiangsu province plays an important role in achieving the national emission reduction goals. In this paper, the system dynamic model of Jiangsu's carbon emission system based on Vensim software is applied to predict the trend of total CO₂ emission and energy consumption in Jiangsu province in the next five years. The results show that Jiangsu province's CO₂ emissions will reach X tons of CO₂- equivalent in 2025, 1.20 times that of 2015 in the baseline scenario. At the same time, energy demand will rise to 1.21 times 2015 levels, approaching 59710 million tons. The scenario analysis of the Vensim CO₂ model in Jiangsu province proves that the implementation of CO₂ emission reduction policies has a significant impact on the expected CO₂ emissions in the future, and the introduction of carbon trading market subsystem plays an obvious role in reducing the negative externalities of CO₂ emission economy. All the results clearly outline the future energy demand and CO₂ emission of Jiangsu province.

Keywords: CO₂ emission reduction; CO₂ emissions; SD model; Scenario analysis; Jiangsu

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
目 录	I
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和研究意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 文献综述	2
1.2.1 国内外文献梳理	2
1.2.2 文献综述述评	4
1.3 研究方案	5
1.3.1 研究目标	5
1.3.2 研究方法	5
1.3.3 研究内容	5
1.3.4 创新点	6
1.3.5 研究技术路线	7
第 2 章 相关概念及理论基础	8
2.1 相关概念	8
2.1.1 系统动力学模型	8
2.1.2 温室气体	8
2.2 理论基础	8
2.2.1 经济外部性与公共物品理论	8
2.2.2 环境指数恶化曲线与环境库兹涅茨曲线	9
第 3 章 江苏省域及排放特征分析	11
3.1 江苏省地理发展概况	11
3.2 江苏省碳排放特征	12
3.2.1 能源消耗特征	12
3.2.2 能源碳排放特征	12
第 4 章 江苏省 VENSIM 碳排放模型的构建	14
4.1 模型模块示意图与基本假设	14

4.2 模型子系统的建立	14
4.2.1 社会经济子系统.....	14
4.2.2 第一产业子系统.....	15
4.2.3 第二产业子系统.....	15
4.2.4 第三产业子系统.....	16
4.2.5 居民子系统.....	16
4.2.6 交通子系统.....	17
4.2.7 碳交易子系统.....	17
4.3 数据来源	18
4.4 现实性检验	18
4.5 敏感性分析	18
第 5 章 江苏省碳减排情景分析	19
5.1 能源消耗模拟.....	19
5.2 碳排放模拟.....	20
5.3 传统碳减排情景分析	20
5.3.1 情景设定	20
5.3.2 模拟结果分析.....	21
5.4 市场化碳减排情景分析	24
第 6 章 结论与展望	25
6.1 结论与政策启示.....	25
6.2 不足之处及未来展望.....	26
参考文献	27
附录： SD 模型子系统变量及函数关系.....	30

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和研究意义

1.1.1 研究背景

气候问题是 21 世纪以来世界面对的最复杂的挑战之一。它不仅仅是单纯的环境问题，而是经济、政治和环境等因素联合作用的综合体^[1]。从《京都议定书》的订立，到巴黎气候大会的召开，一次次拯救人类福祉的举动都牵动着世界人民的心。据 2018 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)公布的报告，若按照现今气候变暖的速度，预计世界气温在 10 年之后会比工业化之前的水平升高 1.5℃^[2]，从而招致海冰减少、海平面上涨和极端天气频发等后果。

在严峻的形势下，世界各国纷纷制定了环境保护计划。英国 2018 年碳排放为 3.61 亿吨，比其排放峰值 6.88 亿吨下降了 47.5%，几乎回归到 1889 年的排放水平^[3]，这一切要归功于英国去煤化行动；美国很早开始制定并实施了洁净空气和能源法案，同时注重市场和技术手段双向并行，积极发展碳交易市场，开发可再生能源技术。我国是世界上碳排放量最大的国家之一，过去一直采用经济发展优先的模式，因此中国在国际社会面临巨大的减排压力。政府数据显示，在气候变暖的大环境下，我国平均气温升高幅度大于同期全球平均值，同时伴有更加频繁的极端天气，例如暴雨、寒潮、沙尘暴、极端干旱等^[4]。

在中国，前 35 个规模城市仅容纳全国 18% 的人口，却贡献了整个国家 40% 的能源消耗和 CO₂ 排放^[5]。江苏省 2017 年 GDP 总量占全国 10.4%，位居全国第二，经济活动频繁，是全国温室气体排放大省，据统计 2016 年有约 1200 家万吨能耗以上工业企业。根据省内气象资料，2017 年江苏省年平均气温居于 15-17℃，高温天气较往年偏多。值得关注的是，密集的建设活动造成省内 PM2.5 浓度水平较高，且难以扩散。这一系列非常规气候现象的出现与碳排放超出环境承载能力有着密切的联系。

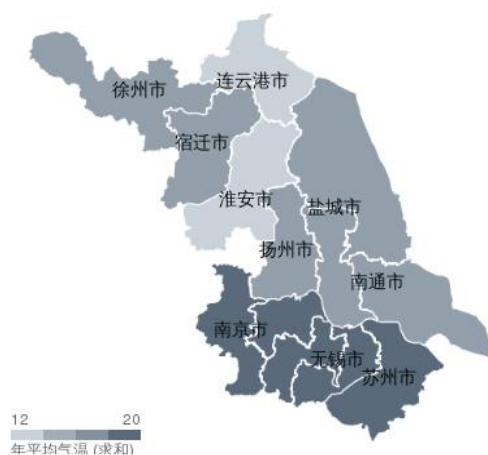


图 1-1 2017 年江苏省各市年平均气温分布图（单位：摄氏度）

十九大报告对于加快完善绿色低碳的循环经济体系具有强烈的导向作用。碳交易正在变得和碳金融一样火热,通过市场交易机制分配碳排放权,成为最经济的减排手段。近些年来我国积极开发碳交易市场,2011 年深圳、上海、北京和重庆等全国七省市成为我国首批碳交易试点,成为率先开发碳市场建设经验的领头羊。虽然在产业和金融基础等方面拥有显著优势,但未被纳入首批试点城市的事实使江苏丧失了先行者优势,成为了碳市场建设的学习型省份。可以看出,江苏省未来在碳市场的建设上还有很长的路要走。

1.1.2 研究意义

(1) 理论意义。首先,本文通过构建仿真系统动态反映社会发展过程中各要素相互影响与制约的关系,较为准确地把握江苏省未来碳排放与能源需求趋势,为制定低碳政策提供理论依据;其次,对传统碳排放 SD 模型进行改进,添加碳交易子系统再次模拟,使模型内容更丰富,也是对于现今碳交易行为日趋火热的反映,为碳市场发展的必要性提供理论支持,因此具有一定的理论意义。

(2) 现实意义。城市治理是政府面临的综合性问题,往往牵一发而动全身。在江苏省制定的打造低碳强省战略框架内,对城市特征的定量化研究有利于政府未来发展目标的合理设定。研究经济发展过程中的碳排放因素,对于江苏省节能减排的实施具有重大意义。此举是对国家碳减排号召的积极回应,而且在一定程度上有利于应对气候变化,对江苏省经济发展具有实际的指导意义。

1.2 文献综述

1.2.1 国内外文献梳理

由于 CO_2 约占大气中温室气体总排放量的三分之二,因此人们习惯于把温室气体过量排放的现象称作碳排放(Carbon Emission)。《京都议定书》附件中的六种温室气体的释热能力各有差异,则全球变暖因子(GWF)被提出用于统一换算气体的释热能力。事实上, CO_2 的 GWF 值为 1,而 CH_4 为 21, N_2O 更是高达 310,它们的温室效应均超过了 CO_2 ^[6]。

对于碳排放的度量,学术界尚未达成统一的标准。在肖皓看来,这是由于从不同视角看待碳排放的责任主体不同造成的结果,例如生产端与消费端视角等^[7]。纵观国内外文献,对碳排放量较经典的测算方法有结构分解分析(SDA)和指数分解分析(IDA)。前者基于“投入产出”一组平衡关系,研究需求对产出的影响;而 IDA 法聚焦于部门水平数据,以最终需求为基础,从碳排放总量中分解因素。实际上,指数分解分析法由于简便及可操作性强两大特性而被广泛使用。由于研究需要各异,不同学者在特定的领域范围内进行碳排放的度量。如郭朝仙和赵选明^{[8]-[9]}在人口、人均 GDP 和产业结构等方面对陕西省碳排放进行了分解;张旺和周跃云^[10]为研究北京能源消费的 CO_2 排放量,分别量化分析了产业结构和能源强度等因素。

除此之外, 实测法和 IPCC 清单法也是碳排放的度量工具^[11]。实测法虽精确度高, 但因成本高而较少被采用; IPCC 清单法是一种利用联合国政府间气候变化专门委员会制定的排放系数来进行碳排放测算的方法。IPCC 清单法既科学又简便, 逐渐开始成为碳排放研究领域的主流方法, 该方法认为减少化石燃料的燃烧是控制碳排放的主要途径, 这与本文的研究口径相吻合。

在碳排放与经济增长关系的研究方面, 国内外学术界的研究方向可大致分为两类。一部分学者对环境库兹涅茨曲线进行深入研究。实证研究区域和数据选取方面的差异导致倒 U 型、S 型和 N 型等不同的研究结果。例如, 揭昌亮等的研究结论表明我国农业增长与化肥面源污染间存在着显著的倒 U 型关系^[12]; 而刘海英等认为我国中部地区的污染物和工业废气的排放与其经济增长间不存在倒 U 型关系^[13]。Kaika 对众多的 EKC 文献进行了梳理, 认为二氧化碳排放与通过能源消耗实现的经济增长有关。大量关于二氧化碳排放的研究表明, 经济增长过程并没有随时间而减少此类排放^[14]。另一部分学者采用脱钩、协整和向量自回归模型等方法进行研究。全世文和袁静婷探究了我国经济增长与碳排放的协整关系, 发现 1980 年是其结构变化的转折年, 且结构变化的类型与环境库兹涅茨曲线的倒 U 型特征相吻合^[15]。李健等探讨了 2007—2016 年天津市经济增长与碳排放之间的脱钩关系, 由此确定天津市碳减排优先次序和发展瓶颈^[16]。张志高等计算了河南省第一产业碳排放的脱钩弹性系数, 发现在 2011 年以后脱钩情况较好, 说明近些年河南省实现了一定程度的农业碳减排^[17]。

关于产业结构对碳排放的影响效果, 不同学者持有不同的观点。有学者认为产业结构对碳排放的影响效果很显著, 杨恺钧和杨甜甜运用中国 30 省市的面板数据分析产业结构和碳排放的关系, 得到了各地区第二产业产值比重的上升对碳排放有不利影响的结果^[18]。庞庆华等认为产业结构的完善会推动 CO₂ 排放量的下降, 对节能减排有着重要影响^[19]。Philip Kofi Adom 等对加纳、摩洛哥和塞内加尔三个国家的格兰杰因果关系检验表明产业结构和碳排放存在着双向因果关系^[20]。然而, 另一部分学者则通过实证检验发现碳减排与各产业结构的关系并不显著。徐成龙利用 LEAP 模型预测发现山东省 2030 年产业结构的调整对碳减排的贡献率较低^[21]。还有学者如董明涛认为不能一概而论, 需要深入讨论各具体产业与碳排放的关联程度^[22]。

“人口要为温室效应负多大的责任?” 为了回答这个问题, 侯东民基于扩展的 $I=PAT$ 公式提出一个区域温室气体的排放与人口总量和增量存在显著的相关关系^[23]。人口作为社会的基本特征通过经济活动间接地影响着碳排放。人口数量决定了人均 GDP, 从而对购买汽车等消费行为产生影响, 因此人口向城市集聚, 居民生活化石能源的消费自然会增加, 最终碳排放量上升^[24]。徐丽指出, 生活部门

已经成为我国能耗第二大部门，并对我国居民部分的能源消耗和碳排放进行了分析和预测，发现我国近十年来居民能源消费碳排放整体呈上升趋势，且估计会一直增长到 2025 年，年增长率约 7.13%^[25]。Yin Long 等利用 49 个日本地级市数据探讨了家庭间接碳源排放及其与潜在影响属性的关系，指出居民部门产生的碳排放对城市碳排放具有重要意义，同时食物、交通和教育与居民碳排放相关性显著^[26]。

广义上，交通运输业从属于居民生活部门。由于是碳排放的一大重要来源，本文认为有单独研究的必要。学者以往从多个角度处理交通碳排放的来源，例如按交通性质分为公共交通和私人交通等^[27]；按交通类型分为公路、铁路和水路等^{[28]-[29]}。还有学者考虑到交通拥堵等状况对碳排放可能造成的影响，进行了相关检验与分析。程铁信构建了考虑碳排放的城市交通拥堵价格模型，认为对交通拥堵的区域附加拥堵成本既有利于交通效率的提高，又减少了碳排放^[30]；李宾基于湘潭市交通实时数据，提出交通拥堵导致的能耗和碳排放幅度的增加不低于 30% 的论断^[31]。

碳交易机制的理论依据立足于西方主流经济学的公共物品、市场失灵以及外部性等理论。王璟珉等从政治经济学角度展开驳斥，认为这种交易机制充其量只是转嫁责任的一种表现，是“皇帝的新衣”的最好印证^[32]。不可否认，作为世界应对气候变暖的重要市场化工具，碳交易机制肩负着环境保护和保障人类可持续发展的重要使命。2005 年，欧盟正式开始运行温室气体交易体系，成为世界上第一个温室气体配额交易市场^[33]。随着我国政府积极践行发展国内碳交易市场的举措，以碳交易价格、试点配额、碳金融等为主题的文献数量迅速增长^[34]。总体上，大多数学者认为碳交易市场的运行能够有效影响二氧化碳排放。王勇等利用三阶段的 DEA 模型对中国地区碳排放效率进行了研究，结果显示碳交易市场的启动对碳排放效率有一定的提升作用^[35]。程永伟等分析了广东省碳交易的实施成效，认为收紧的碳排放政策能够有效提升成交量，并存在减排效率 Pareto 优化区间^[36]。Slobodan Perdan 则认为碳交易市场受到经济情况、政治环境和政策信号等众多因素的约束。如今全球经济动荡，加之国际气候协定缺乏法律制约性，使得碳交易进入不确定时期^[37]。

1.2.2 文献综述述评

前文通过阐述碳排放的含义及度量、碳排放与经济、产业、居民、交通和碳交易系统关系的研究现状，为本文的模型构建奠定了理论基础。从以上分析可以看出，国内外有关碳排放的研究多不胜数，研究方向也各有侧重，政策对学术研究的导向性较强。国外关于碳排放的研究早于我国，相对而言也比较成熟。由于我国面临的环境矛盾越来越突出，探索碳制度的需求更加紧迫，引发了学者对于

此类问题的研究热潮。然而，地域广阔性和方法多样性等造成了研究结论参差不齐、研究广度大于深度等问题。因此，有必要做更加深入详细的探讨，才能对碳排放问题有更深刻的理解，对实际有更明确的指导思路。

1.3 研究方案

1.3.1 研究目标

本文综合管理学、计量经济学和西方经济学等学科理论，结合江苏省 2000-2017 年宏观经济时间序列数据，借助 SPSS 和 Vensim 软件进行回归分析与情景模拟，深入探讨碳排放、能源消耗与经济关系的内在关系，期望达到以下目标：

（1）在界定碳减排的概念的基础上，借鉴已有的相关研究，分别建立影响碳排放的相关子系统，建立系统动力学因果回路图和存量流量图，以便理清不同子系统之间的相互作用及其整体影响碳排放的内在机理。模型的数据和函数关系都是连续一致的，能够为决策者提供统一连续的分析平台。

（2）利用相关数据，本文设定不同的减排方案，运用仿真指标来详细分析各方案的差异性。模型的基准情景预测了江苏省经济系统未来的走势，以及发展过程中可能遇到的问题。本文还将进一步结合江苏省域特征，从经济可持续性角度提出相关的政策措施来寻求最优路径，以期对相关决策部门提供有益借鉴。

1.3.2 研究方法

（1）文献分析法。针对能源消耗与碳排放现状，检索相关的文献和著作，大致筛选后，对选取的文献有针对性的精读和泛读，整理相关文献使用的方法和研究的内容，对相关文献进行记录，为课题的研究奠定基础。

（2）理论分析与实证分析相结合。本文将进行理论分析，并且对江苏省碳排放现状进行阐述，以经济学理论为基础建立江苏省 Vensim 碳排放模型模型，并收集 2000-2017 年江苏省宏观经济数据进行实证检验与未来预测，运用情景分析法对减排方案进行测度和对比，根据实证结果提出政策建议。

1.3.3 研究内容

论文包括 6 章内容，框架如下：

第 1 章，绪论，引出话题。阐述国内外学者对碳排放及相关问题的见解、本文的写作背景及意义、研究目标及方法、章节安排等。

第 2 章，相关概念及理论基础。简要说明经济外部性、公共物品和环境库兹涅茨曲线等重要概念的定义与特点；介绍本文所用到的系统动力学模型工具，为本研究打下相应的理论基础。

第 3 章，江苏省域及排放特征分析。本章节利用相关资料介绍江苏省地理发展状况，勾勒江苏省排放现状与问题。

第 4 章，江苏省 Vensim 碳排放模型系统的构建。建立江苏省碳排放模型各子

系统（分为社会经济、农业、工业、服务业、居民、交通和碳交易子系统），介绍各子系统变量之间的因果关系，并说明本文数据来源。

第 5 章，江苏省碳减排情景分析。本章也是本文的创新章节，着重细化考量不同种类的发展情景（分为基准情景、发展情景、低碳情景和强化低碳情景）对于 CO_2 排放量、GDP 等的差别影响。同时，引入碳交易系统进行模拟，对政府碳交易市场的开发提出创新建议，并为企业在低碳政策影响下的碳交易提供思路。

第 6 章，结论与展望。总结前文，并对江苏省未来生存碳足迹作相应的展望。

1.3.4 创新点

（1）研究方法创新：论文将采用理论分析与实证分析相结合的研究方法，是一般系统动力学模型的具体化运用，深入探讨经济、人口、产业、交通等不同方面对于碳减排的影响程度；

（2）研究背景创新：在当下国家大力推动碳交易试点城市、碳交易平台的建设等一系列改革的影响下，理论界越来越关注这一话题。然而，作为中国的经济大省，江苏并未被纳入到第一批的试点城市中。针对这一特殊背景来研究江苏碳减排优化路径的文章较少，因此有研究的必要性；

（3）研究维度创新：论文对于不同的减排情景的分类较为细致。相应地， CO_2 排放影响 GDP 总量的路径也更精准，更具实用价值；

（4）研究角度创新：从系统论和整体论的角度出发，以子系统为出发点，以减排效果为落脚点，以小见大，数据可靠。

1.3.5 研究技术路线

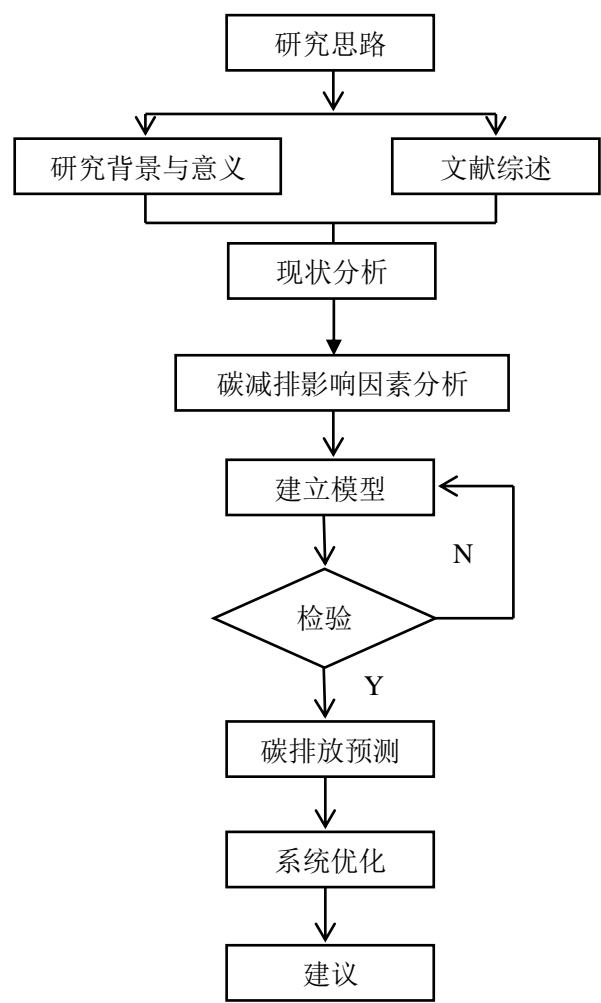


图 1-2 技术路线图

第 2 章 相关概念及理论基础

2.1 相关概念

2.1.1 系统动力学模型

系统动力学 (System Dynamics) 现已发展为管理科学与工程的重要一环, 其创始人是MIT的Jay W. Forrester教授。由于方法限制, 早期的科学研究对于变量间因果关系的处理比较粗糙, 往往孤立地分析X与Y之间的联系。随着经济、社会、科技等的迅猛发展, 企业、组织和生态系统内部变得越来越复杂, 系统动力学的出现为系统的动态分析提供了方法。同时, SD模型专用模拟软件与语言的发展极大地提高了建模的便利性。

目前, 该方法被广泛运用于分析公司战略、学习型组织、供应链与物流、宏观经济和碳排放等领域。近些年, 随着碳排放市场的不断建设和碳排放交易权法律的相继落地实施, 运用SD模型研究碳排放领域的文献呈现出指数型增长趋势。

然而, 模型结果的准确性对建模步骤的严谨性提出了很高的要求, 包括明确系统边界、提出动态假说、确定方程、模型测试和情景设置等。本文将从第4章开始具体化模型。

2.1.2 温室气体

气候变化是人类几十年来必须面对的一项重大挑战。而全球气候变化的罪魁祸首是大气中过量的温室气体 (Greenhouse Gas, GHG) 的存在, 即水蒸气 (Water Vapor)、二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、一氧化二氮 (N₂O) 和氯氟烃 (CFC) 等。工业革命以来, 世界重工业飞速发展, 导致温室气体过量排放, 超出大气标准, 使全球气温上升, 威胁人类生存。

CO₂不是温室气体排放中最主要的气体, 但却是减轻气候变暖最关键的温室气体, 因为它主要由人类活动产生, 包括化石燃料的燃烧、交通的运行、工业生产等。由于数据获取的便利性, 本文主要关注人类生产生活中二氧化碳的排放。

2.2 理论基础

2.2.1 经济外部性与公共物品理论

在西方经济学理论体系中, 经济外部性 (Externality) 指的是经济个体强加的成本或收益, 因而导致私人成本或收益偏离于社会成本或收益, 产生资源配置不当的现象。外部性分为外部经济和外部不经济。当私人收益大于社会收益时, 我们称其为外部不经济; 反之则产生了外部经济。

公共物品 (Public Goods) 对立于私人物品 (Private Goods), 兼具非排他性和非竞争性。环境资源属于一种典型的公共物品或准公共物品, 若非合理的规划利用, 则会产生较大的负外部性, 陷入恶性循环, 甚至导致公地的悲剧。

与每个人都息息相关的环境问题，仅仅依靠市场机制是无法有效解决的。政府应积极发挥作用，以市场为基础，发放可交易碳排放许可证不失为一种有效的办法。确定社会的最优排放水平后，将配额总量适当地分配给经济个体，允许个体之间的配额交易，对于超排个体予以经济惩罚。

2.2.2 环境指数恶化曲线与环境库兹涅茨曲线

20 世纪 70 年代初，“罗马俱乐部”提出“增长极限”的观点，认为在自然的约束下，经济增长是不可持续的，应优先保护环境，降低经济增长率^[38]。目前，学术界对于环境退化与经济发展的直接关系存在两种主要的观点。第一，环境退化与经济增长之间存在着正相关关系，即环境指数恶化曲线；第二，环境问题呈现出随着经济的增长先恶化后好转的趋势，即环境库兹涅茨曲线(EKC)。

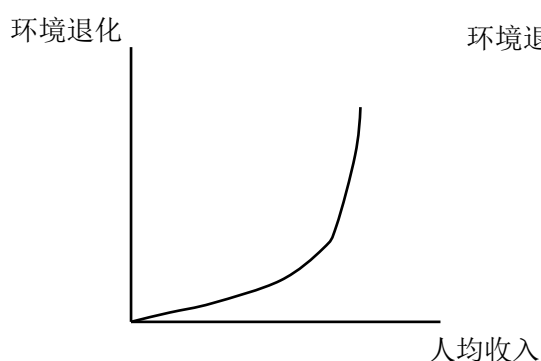


图 2-1 环境指数恶化曲线

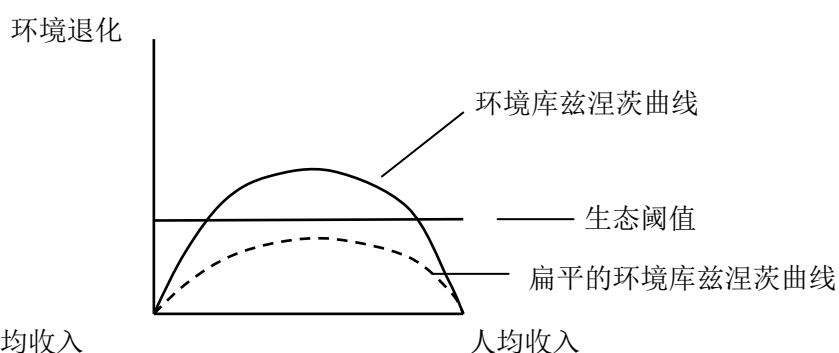


图 2-2 环境库兹涅茨曲线

理论上，二氧化碳排放应属于以上第一种观点，即环境指数恶化曲线^[39]。随着社会经济的发展，整个社会对于产品和服务的需求会增加，而燃料的燃烧是为了产出产品和服务，从而导致温室气体排放量的不断上升。

然而，人均收入的增加不能是影响环境退化的唯一变量，因为环境退化是一个复杂的问题，不能用人均收入来全面解释。很多年来，环境库兹涅茨曲线在主流经济学研究中经常被提及和使用，它衍生于美国经济学家库兹涅茨提出的收入库兹涅茨曲线。在《1992 年世界发展报告》中，EKC 的定义是：“在技术和环境投资不变的前提下，更多的经济活动意味着更多的环境污染，但是人们会更加关注环境问题，并随着收入的增加而解决环境问题^[40]。”因此随着经济的发展，环境表现出一个先恶化再治理的过程。

近年来，环境库兹涅茨钟形曲线的合理性问题一直处在激烈的辩论中。大多数发展经济学家认为，由 EKC 可知，即使在短期内严重地破坏环境，经济发展从长远来看有益于环境问题的解决。总体来说，EKC 假设认为，经济增长是环境恶化的补救措施，而非对环境的威胁。该观点遭到众多环境经济学家的批驳，认为其忽视了生态承载力的上限。当对环境产生不可逆转的破坏时，环境的恶化定会在收入达到一定的水平之后保持下去，此时 EKC 存在的合理性就站不住脚了。因

此，节能减排、保护环境的行为不能等到收入水平上升到一定阶段再进行，而应一直独立于经济活动来展开^[41]。

第 3 章 江苏省域及排放特征分析

3.1 江苏省地理发展概况

江苏省属于我国东部地区，地处长江经济带，交通便利，林业和矿藏资源丰富，具有优厚的地理条件和自然环境。在人、财、物的充分涌流下，江苏经济发展迅速。2018 年 GDP 总量达到 9.2 万亿，仅次于广东省，经济规模已超过世界第三大经济体澳大利亚。2017 年江苏全省常住人口为 8029.3 万，占全国总人口的 5.78%。

江苏省下设十三个直辖城市。根据地理因素，这些城市被划分为三大区域：苏北地区（徐州、连云港、宿迁、淮安、盐城）、苏中地区（扬州、泰州、南通）和苏南地区（南京、苏州、无锡、常州、镇江）。三大地区经济梯度差距明显，2017 年各区域的地区生产总值分别为 20268.77 亿元、17544.10 亿元和 50175.20 亿元。在此现实情况下，江苏省大力推动区域协同发展，实现资源优势互补。根据《江苏省国民经济和社会发展的“十三五”发展规划纲要》苏南创新提升、苏中创新跨越、苏北创新突破的整体要求^[43]，苏北地区积极承接苏南产业转移，既为苏北经济发展添补了动力，又给苏南产业升级提供了契机。

在资源方面，有着 400 公里长江岸线的江苏省林业和湿地资源丰富。“十二五”末，全省林木生长总面积达到 227.8 万公顷，湿地资源占土地面积的四分之一^[44]。随着江苏省城镇化水平的不断上升，加上以木材加工业为主的第二产业占主导地位，林业和湿地资源的效益被一定程度挤压。江苏省北部煤炭资源丰富，以煤作为社会经济和生活的主要驱动力。由于煤的燃烧效率低、污染严重等特征，近年来江苏省积极开展“去煤化”行动，到 2020 年全省将减少 3200 万吨煤炭消费^[45]。

2016 年，结合现实情况，江苏省政府发布了未来经济发展的一些主要目标项，如下表所示：

表 3-1 江苏省“十三五”规划主要目标（2020 年指标值）

指标	数值	指标	数值
GDP 增长率	7.5%	总人口	8200 万人
人口城镇化率比重	67%	万元国内生产总值能耗降低率 (与 2015 年比较)	17%
服务业增加值占 GDP	53%	单位工业增加值能耗降低率 (与 2015 年比较)	18%
消费对经济增长的贡献率	55%	单位工业增加值 CO ₂ 排放量降低率 (与 2015 年比较)	19%
居民人均可支配收入	4.2 万元	非化石能源占一次性能源消费比重	10%

资料来源：《江苏省“十三五”发展规划纲要》

3.2 江苏省碳排放特征

3.2.1 能源消耗特征

查找《江苏省统计年鉴 2001-2017》中历年主要能源产品及其消费量，结合本文能源碳排放量的测算方法，剔除某些未被纳入统计范畴的能源如液化石油气，计算江苏省能源消耗碳排放量。

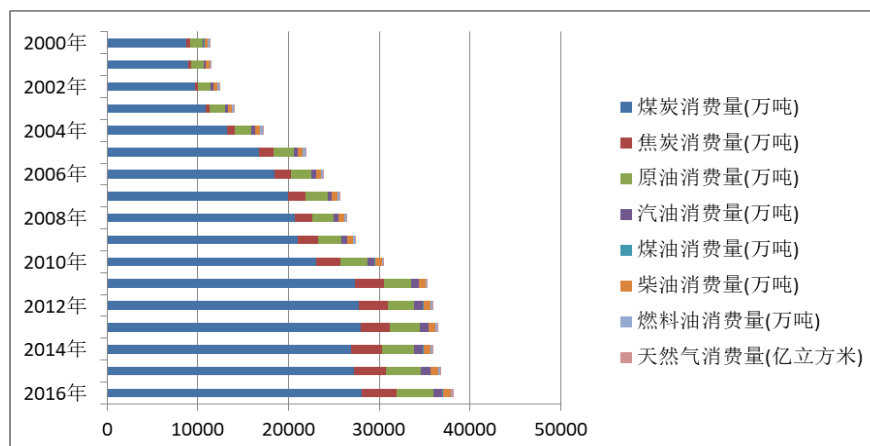


图 3-1 江苏省 2000-2016 年主要化石能源消费量

能源消费是社会物质财富增长的前提，产业结构一定程度上决定了能源消费结构，可以观察到比重较大的第二产业以消耗煤炭资源为主。随着经济体量的增加，各种能源的绝对需求量呈现上升趋势。2000-2016 年，江苏省前七种能源消耗总量增加近 26752.34 万吨，年均增长 2432.03 万吨。此外，2005 年以后焦炭和原油消耗量相对逐年上升，而原煤的比例相对下降，这可能是由于江苏省积极响应国家优化能源结构的号召并积极调整自身产业结构。

3.2.2 能源碳排放特征

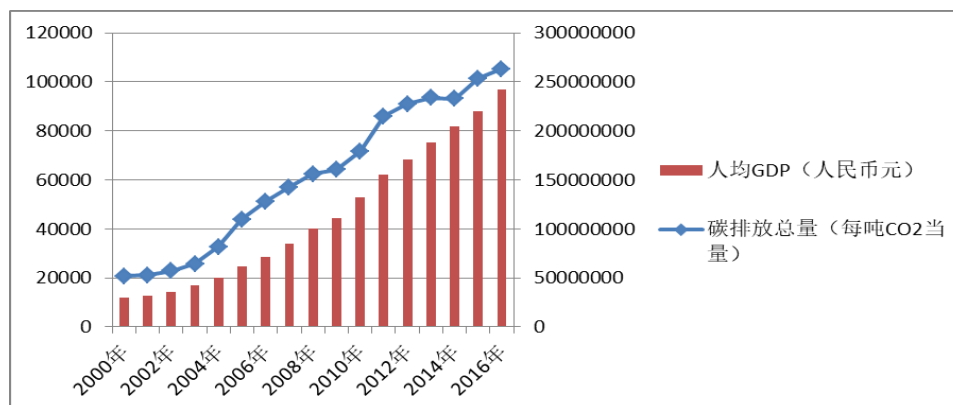


图 3-2 江苏省 2000-2016 年人均 GDP 和二氧化碳排放量

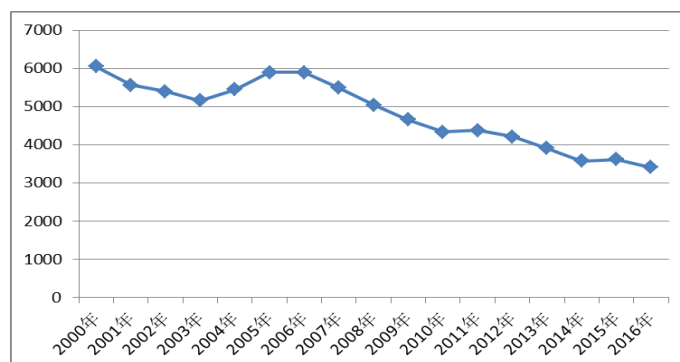


图 3-3 江苏省 2000-2016 年碳排放强度 (单位: 吨碳/亿元)

从图 3-2 容易看出,江苏省能源消耗碳排放总体上是增加的,但上升过程中呈现明显的阶段性特征。第一阶段是 2000-2003 年,碳排放呈缓慢上升的态势。由 2004 年开始,排放量上升速度加快,此为碳排放的第二阶段。2008 年由于世界经济危机导致的经济疲软、发展速度降低,碳排放量也有所下降。由于经济的复苏,此后的第三阶段产生了越来越多碳排放行为。

数十年来,江苏省人均 GDP 与碳排放量呈现出明显的正向单调线性关系,说明江苏省目前并未摆脱环境高污染的发展阶段。为推动环境库兹涅茨曲线拐点的早日到来,江苏省应该理清碳排放与经济内在机理,并有效施策。

根据图 3-3, 21 世纪以来江苏省碳排放强度从 6000 下降到 3500 吨碳/亿元,单位 GDP 含碳量的整体下降说明在实现经济快速发展的同时,江苏省通过实际行动取得了一定的减排成效。

综上所述,在全球经济下行压力增大的背景下,江苏省经济持续增长且保持稳中向好的基本面,区域经济发展更加协调,生态环境稳步改善。与此同时,一些制约江苏省经济社会的问题仍有待解决,高比例的煤炭消费和逐年增加的碳排放量表明江苏省的节能减排工作还有很大的进步空间,其生态环境问题尚未根本好转,仍需进一步改善。

第 4 章 江苏省 Vensim 碳排放模型的构建

4.1 模型模块示意图与基本假设

江苏省碳排放仿真系统的边界是江苏省的总行政区划。根据研究目的和可得数据，将模型的结构设计为七个子系统的结合。若从供给侧和需求侧的角度分析，江苏省的能源供给包括煤、汽油、柴油、焦炭、燃料油和天然气等，需求面则囊括三大产业、居民生活、交通运输业等。

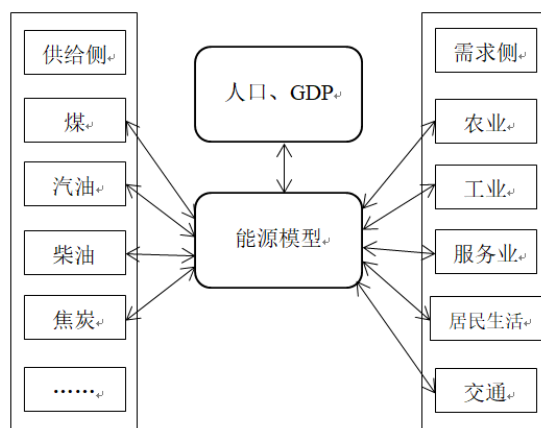


图 4-1 从供给和需求侧出发的模块示意图

从模型普遍性的角度出发，对江苏 Vensim 碳排放系统作以下假设：

- 假设 1：不考虑江苏省的能源自产能力，默认所有类别能源都能得到有效供应；
- 假设 2：忽略能源价格对需求的影响，直接以能源消耗量作为计算碳排放量的依据；
- 假设 3：政府具有调整 GDP 增长速度、产业结构等的的能力。

4.2 模型子系统的建立

4.2.1 社会经济子系统

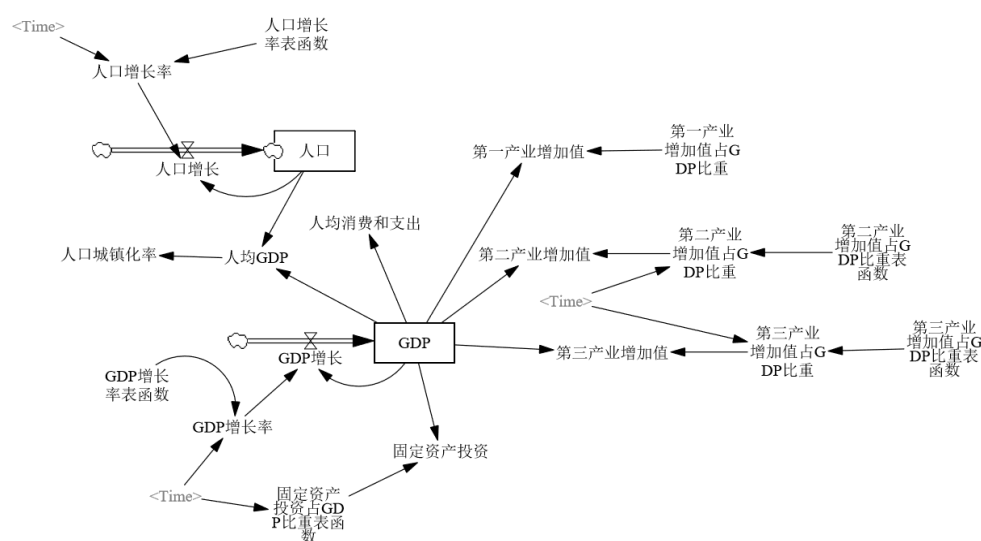


图 4-2 社会经济子系统流程图

社会经济子系统是江苏Vensim碳排放系统的核心。该系统设置2个状态变量和

速率变量、若干辅助变量以仿真人口、国内生产总值与产业结构间的动态关系。值得注意的是，人均GDP成为连接人口与GDP的重要纽带，进一步通过影响人口城镇化率（非农村人口占总人口的比例）作用于工业子系统；同时，与GDP有关的三大产业增加值是三大产业能源消耗的基础，城镇化水平与能源消费量是碳排放的驱动力。这样一来，社会经济子系统就与以下各子系统有机地联系了起来。

4.2.2 第一产业子系统

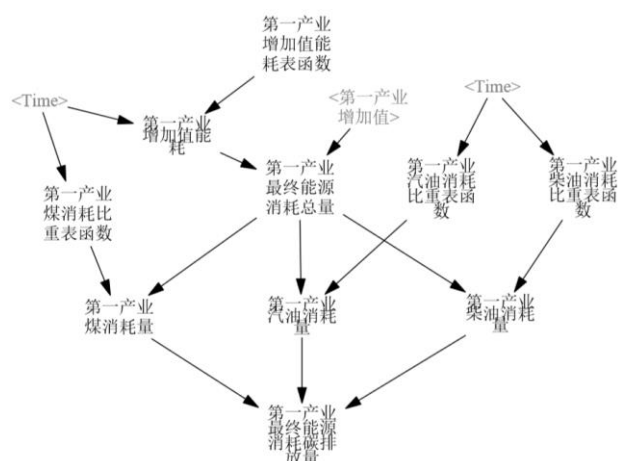


图 4-3 第一产业子系统流图

第一产业子系统主要描绘农业在碳排放过程中扮演的角色。农业碳排放的来源非常复杂，家禽养殖、农业废弃物和生物燃烧等产生的碳排放量不容小觑，但考虑到数据的可获得性和模型的简洁性，该系统着眼于农业活动中煤、汽油和柴油等化石能源的消耗。根据往年的排放数据灵活地设定表函数，有效预测未来农业碳排放对碳系统的影响。

4.2.3 第二产业子系统

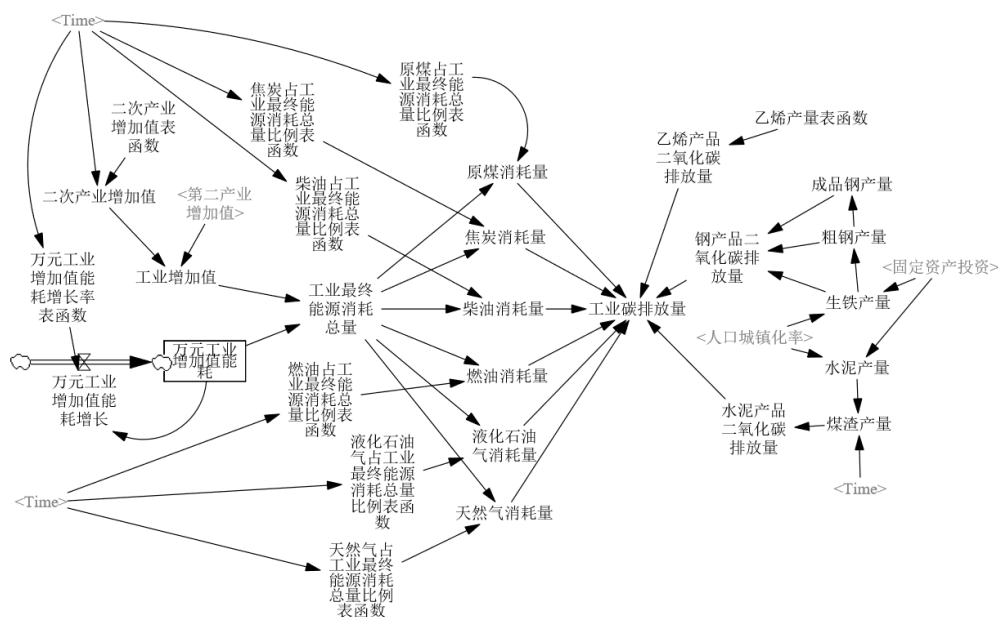


图 4-4 第二产业子系统流图

第二产业对于碳排放系统的贡献大致被分为两部分：化石能源的消耗和工业产品的制造。作为能源驱动型产业，工业的能源需求量是巨大的，包括原煤、焦炭、柴油、燃料油和天然气等。化石能源消耗量成为工业碳排放量的主要来源。除此之外，江苏省城镇化水平在较高基础上依然保持较快速度地增长，过去五年，全省城镇化率由 64.1% 增长到 69.61%，位居全国第 5 位^[42]。城市化通过乘数效应作用于投资，城市扩张的规模有力拉动投资。城市基础设施建设的增加扩大了水泥和钢铁产品的需求，导致工业碳排放量更多的增长，反映在流图的右边部分。森林等天然植被的减少打破了碳循环系统的稳定，减少了森林碳汇，使得森林生态效益的发挥被挤压。

4.2.4 第三产业子系统

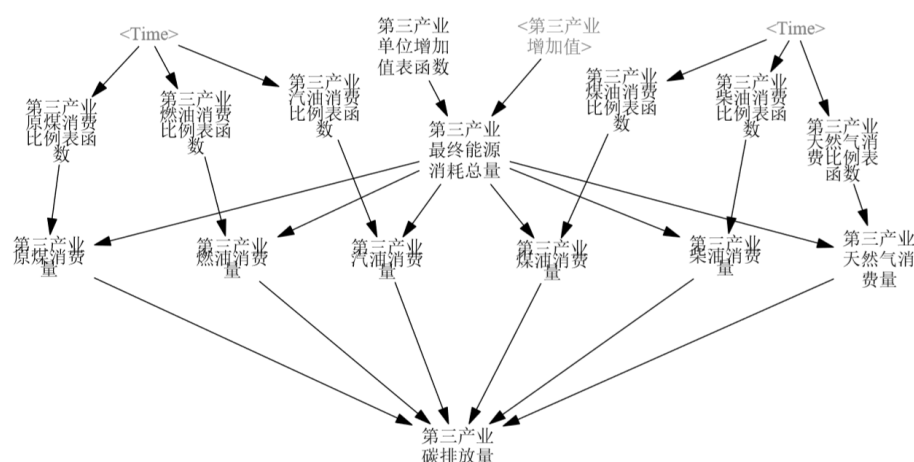


图 4-5 第三产业子系统流图

2015 年江苏省服务业产值比重超过工业，成为拉动经济增长的最大产业。因此，第三产业温室气体排放量仅包含了第三产业终端能源消耗的碳排放量，例如原煤消耗、燃料油消耗、汽油消耗和天然气消耗等。

4.2.5 居民子系统

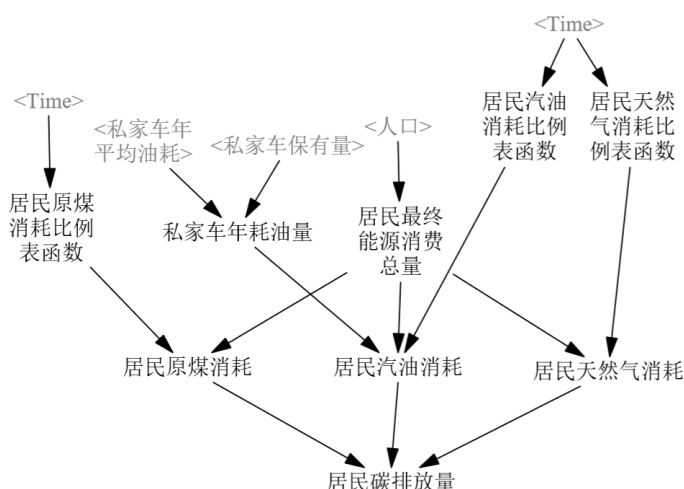


图 4-6 居民子系统流图

和服务业子系统类似，居民子系统旨在测算居民最终能源消耗总量导致的居民碳排放量的多少。在居民子系统中，居民私家车汽油消耗导致的碳排放量未被包含在其中。该项被放置在交通子系统中，以免重复测算。很明显，人口的增加会直接导致居民能源消耗量和居民生活中温室气体排放的增长。

4.2.6 交通子系统

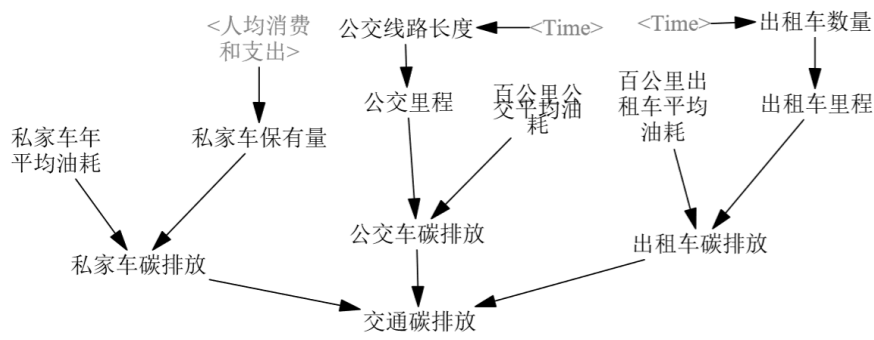


图 4-7 交通子系统流图

私人交通和公共交通共同组成了城市的交通系统，对其分别进行研究不但有利于反映交通系统的全貌，而且能够更好地分析私家车和公共交通使用量对碳排放系统的敏感性程度。人均 GDP 与人均消费和支出具有密切的关系，以此影响居民私家车的保有量，导致私家车碳排放量的变动。公交车和出租车类似，都是通过其行驶里程和油耗能力共同对碳排放造成影响。

4.2.7 碳交易子系统

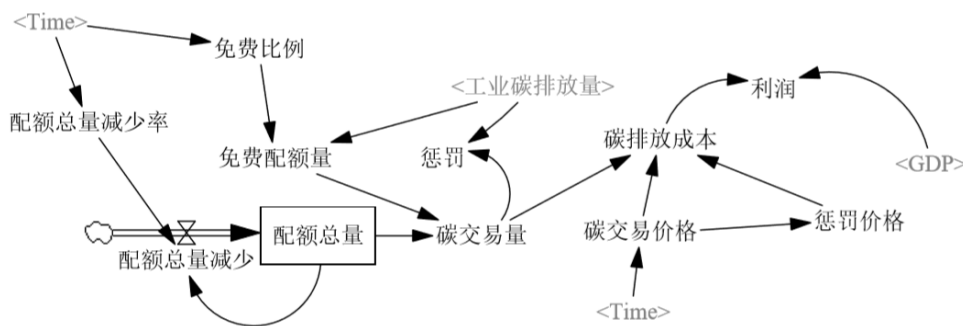


图 4-8 碳交易子系统流图

碳交易子系统作为虚拟子系统被引入模型中，用于探讨碳交易市场的发展对于减排工作的有效性。具体来说，免费配额是依据污染物排放量来分配的碳排放数量单位，免费配额与实际需要的排放量之间的差额成为碳交易需求的来源。该子系统通过 GDP 与工业碳排放量与整个模型建立联系，为江苏省二氧化碳排放空间商品化的发展提供了一种前景设想。由于江苏省未有开展碳交易的经验数据，本文借鉴参考广东省与上海市碳交易配额总量数据，设定江苏省的初始参考值为 3 亿吨^[46]。

4.3 数据来源

本文数据主要来源于 2001-2018 年江苏省统计年鉴和国家数据网,例如江苏省常住人口、三大产业产值、GDP、固定资产投资等。对于某些缺失的数据,采用拟合回归等方法进行补充处理。另外,采用 2006 年《IPCC 国家温室气体清单指南》中的排放系数对各能源的碳排放量进行测算。

4.4 现实性检验

碳排放模型的仿真与现实情形存在一定差距,一定范围内的差距是可被理解与接受的。为了确保正确的行为由正确的原因产生,本文对 2014-2017 年江苏省 GDP、总人口、固定资产投资和基于能源消费的碳排放总量等变量进行了历史检验。结果表明各个变量的相对误差均控制 5%在范围内,说明模型所描述的系统行为与现实情况大致吻合,模型的有效性得到验证。

表 4-1 主要变量实际值与模拟值比较

变量名	2015 年			2016 年			2017 年		
	实际值	模拟值	误差	实际值	模拟值	误差	实际值	模拟值	误差
GDP(亿人民币)	71290	74320	4.25%	77388	80260	3.71%	85901	85880	0.02%
总人口(万)	7976	8086	1.38%	7999	8102	1.29%	8029	8125	1.20%
固定资产投资(亿人民币)	45905	47860	4.26%	49371	51210	3.72%	53000	52990	0.02%

4.5 敏感性分析

为了研究输入参数对系统行为变化的影响,更准确反映现实经济——能源运行情况,对变量的敏感度分析是必要的。经济和人口是社会经济发展和能源消耗最重要的驱动力之一,为了较好地模拟现实,本文建立了 GDP 增长率和人口增长率表函数。

为了检验常量的设定值是否合理,对私家车年平均油耗、百公里公交平均油耗等常量进行敏感性分析,结果如图 4-9 所示。分析结果显示其数值敏感程度不高,说明模型的行为模式并未因为常量的微小变化而变动。

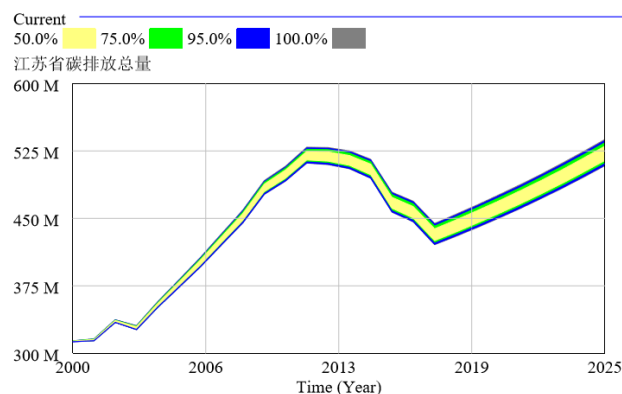


图 4-9 私家车年平均油耗敏感性测试结果

第 5 章 江苏省碳减排情景分析

5.1 能源消耗模拟

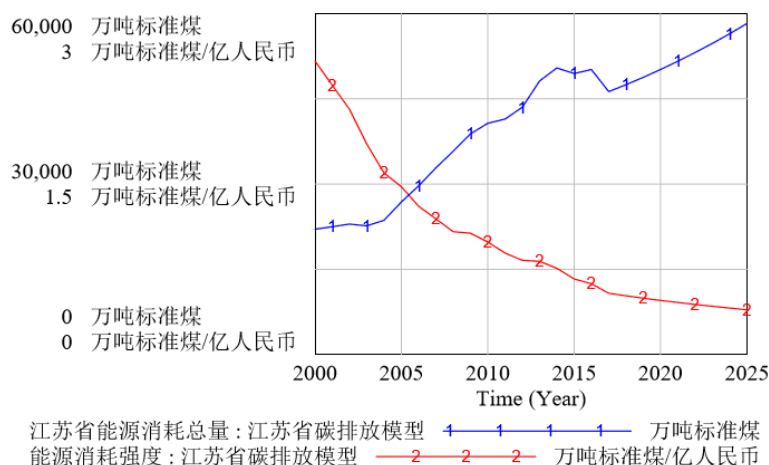


图 5-1 2000-2025 年江苏省能源消耗总量和强度

江苏省碳排放模型 2000-2025 年的仿真结果如图 5-1 所示。随着人口总量的不断增加和人口城镇化率的逐步提升，江苏能源消费总量预计将从 2000 年的 22060 万吨标准煤增长到 2025 年的 58210 万吨标准煤，年增长率为 4.13%。然而按单位国内生产总值计算的能源消耗强度则从 2005 年的 2.58 tce/万元下降到 2025 年的 0.39 tce/万元，年均下降 8.19%。这说明江苏将在提高能源利用效率方面取得巨大成就，即使其能源消费总量反倒呈上升趋势。

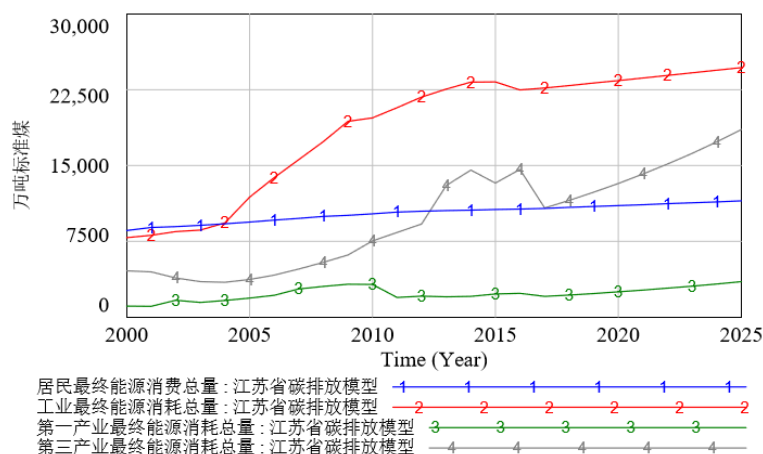


图 5-2 2000-2025 年江苏省各部门能源消耗量

从产业部门来看，工业能源需求一直占据主导地位，其次是服务业。考虑到近年来的发展趋势，服务业在产业中的比重会逐渐升高，直到超过工业。因此，服务业的能源消耗会相应上升。此外，居民消费部门的绝对能耗也呈缓慢上升趋势，私家车的普及是居民能源需求上升的一大动因，但公共交通设施的完善部分抵消了私人交通的能源需求。

5.2 碳排放模拟

2000-2025 年江苏省碳排放量总体上呈增长趋势，从 2000 年的 312.9M 吨二氧化碳当量增加到 2025 年的 570.5M 吨二氧化碳当量。预计到江苏“十三五”末期，碳排放量将达到 509.3M 吨二氧化碳当量，是 2000 年排放量的 1.63 倍。另外，可以看到江苏省近些年的碳排放增量在逐渐下降，这可能与江苏省“十三五”环保举措的实施有很大关联。例如，健全节能减排监测和预警体系、加强能源消费总量和强度控制等。

江苏省各部门历年碳排放量如图 5-3 所示。在其他部门碳排放量上升的情况下，居民碳排放量波动下降，25 年来减少了约 200M 吨二氧化碳当量。一方面，此现象的出现可能与本世纪天然气工程的全面铺开有关，相对清洁的天然气使用量的巨大上涨直接导致了居民部门碳排放量的下降；另一方面可能是由于该部分把交通碳排放量单列在居民部门之外导致的。从各部门占有的比例来看，工业与交通运输业占碳排放的比例很高。虽然第三产业在产业结构中的比例越来越高，但因服务行业的特殊性质，碳排放量远不及能源消耗量增长速度。

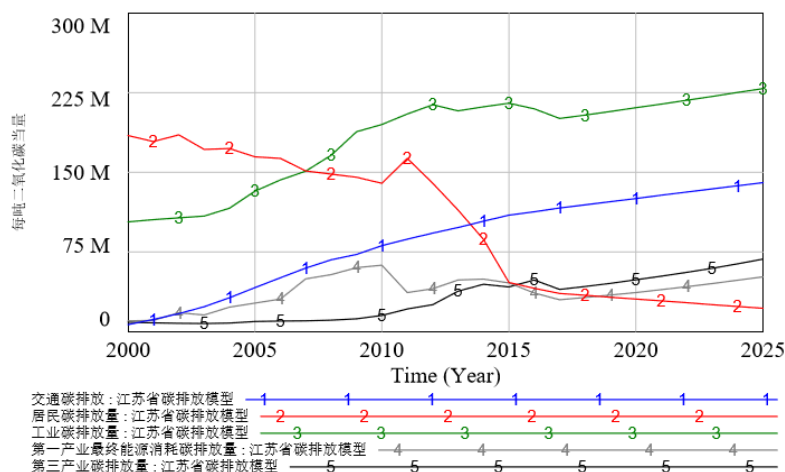


图 5-3 2000-2025 年江苏省各部门碳排放量

5.3 传统碳减排情景分析

5.3.1 情景设定

基于江苏省 Vensim 碳排放模型对 2000-2017 年各项指标模拟值的检验，本文尝试设定不同变量调控模拟江苏省 2020-2025 年社会经济发展状况。社会经济子系统是该模型的主控系统，GDP 和人口是最终能源消耗和碳排放量的决定性因素。尤其当下正处于全面二胎政策放开的初期，人口增长率使得人口规模发生变化，进而影响碳排放量。第二产业的发展以能源的消耗为驱动力，第二产业比重和能源使用效率成为降低碳排放量的关键，因此万元工业增加值能耗增长率和第二产业增加值占 GDP 比重被纳入情景分析。此外，固定资产投资占 GDP 比重也被用于设定情景。

这些指标的预测值主要来源于政府文件和相关文献。《江苏省“十三五”发展规划纲要》提出，2020 年江苏省的年均 GDP 增长率约为 7.5%。在经济新常态下，政府正有意放缓社会经济的增长。专家预测，2025 年江苏省年均 GDP 增长率将下降到 6.5%左右。因此，我们将 7.5%和 6.5%分别设定为基准情景下的年平均 GDP 增长率。分别调整人口增长率、万元工业增加值能耗增长率、固定资产投资占比和工业增加值占 GDP 比重等指标，如表 5-1 所示，得出另外 3 种排放情景：发展情景、低碳情景和强化低碳情景。

表 5-1 江苏省 Vensim 系统决策变量预测值设定表

决策变量	情景类型	预测值	
		2020 年	2025 年
GDP 增长率 (%)	基准情景	7.5	6.5
	发展情景	8.5	7.5
	低碳情景	7	6
	强化低碳情景	6.5	5.5
人口增长率 (‰)	基准情景	10	8
	发展情景	10	8
	低碳情景	8	7
	强化低碳情景	8	7
万元工业增加值能耗增长率 (%)	基准情景	-5	-5.5
	发展情景	-5	-5.5
	低碳情景	-5	-5.5
	强化低碳情景	-6	-6.5
固定资产投资占比 (%)	基准情景	60	58
	发展情景	60	58
	低碳情景	58	56
	强化低碳情景	58	56
工业增加值占比 (%)	基准情景	45	40
	发展情景	45	40
	低碳情景	44	39
	强化低碳情景	42	37

5.3.2 模拟结果分析

情景模拟的目的在于分析江苏省碳排放的理想路径。利用变量间的交织关系仿真江苏省现实经济的运行，关键指标的选取对于经济运行的方向至关重要。模型运行之后变量指标的模拟值如表 5-2 所示，其变化趋势如图 5-4 至 5-6 所示。

表 5-2 四种情景下江苏省经济发展指标模拟结果

情景类型	年份	GDP (亿人民币)	CO ₂ 排放量 (每吨 CO ₂ 当量)	能源消耗量 (万吨标准煤)	能源消耗强度 (万吨标准煤/亿人民币)
基准情景	2020	105,700	453.1M	50,380	0.4766
	2025	148,900	546.7M	59,710	0.4009
发展情景	2020	106,700	455.6M	50,750	0.4757
	2025	157,500	567M	62,500	0.3968
低碳情景	2020	105,200	455.7M	50,200	0.4771
	2025	144,800	543.3M	58,510	0.404
强化低碳情景	2020	104,700	460.7M	49,790	0.4754
	2025	140,800	537.6M	56,300	0.3999

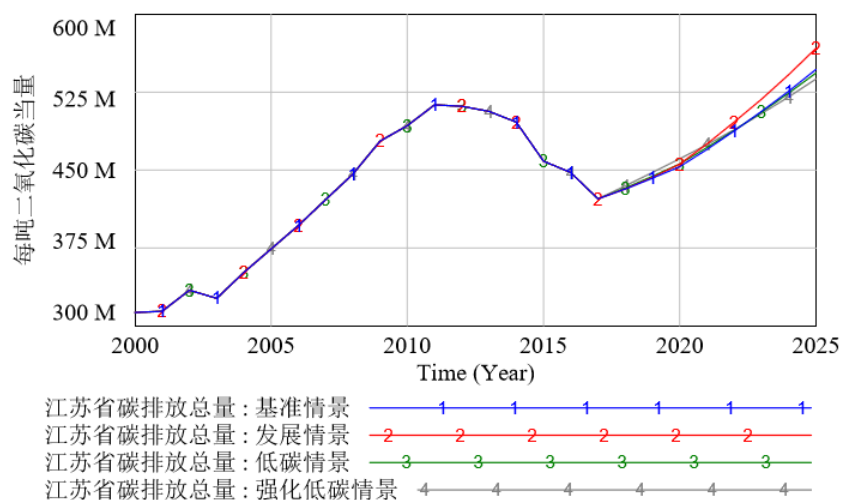


图 5-4 江苏省 CO₂ 排放量变化趋势

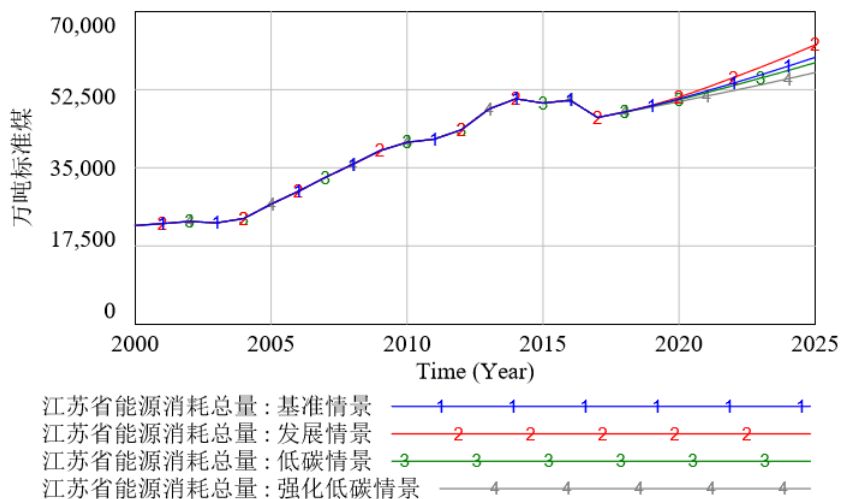


图 5-5 江苏省能源消耗量变化趋势

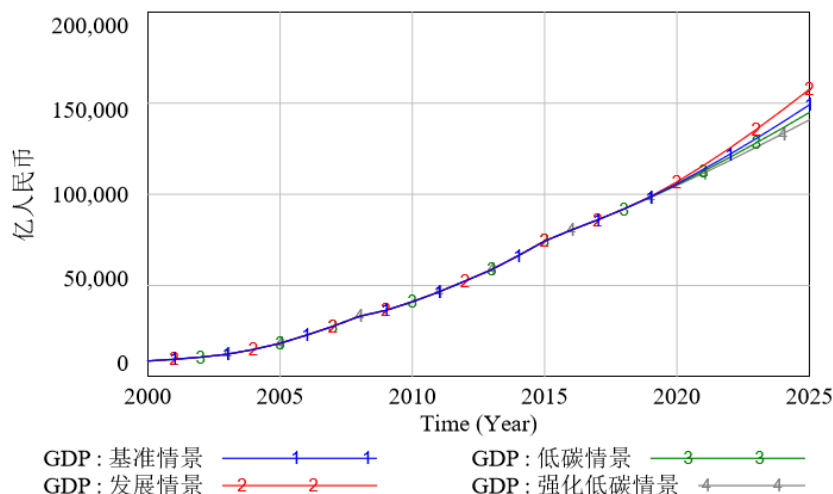


图 5-6 江苏省 GDP 增长趋势

根据图 5-4，未来江苏省碳排放量在所有情景中都呈现上升趋势，但 2013 年至 2017 年略有下降。更具体地说，基准情景预测 2025 年江苏省碳排放将达到 546.7M 吨 CO₂ 当量。经济更强劲的发展情景带来了最多的碳排放量，达 567M 吨 CO₂ 当量，而强化低碳情景的 CO₂ 排放量最少。然而，相对位置不是一成不变的。在 2020-2022 年指标刚设定的阶段，代表着更低水平的 GDP 与人口增长的低碳和强化低碳模式却排放更多数量的二氧化碳，这一现象的出现可能与政策的时滞有关。2023 年以后，低碳的目标设定开始发挥作用，2025 年两个极端情景的 CO₂ 的减排量差值达到 29.4M 吨 CO₂ 当量。从长远来看，强化低碳政策对于减少江苏省碳排放总量有重要影响。2013-2017 年碳排放量明显下降可能是由于政府加快淘汰水泥、电力等行业的落后产能，促使其产能下降。有理由相信，在未来很长一段时间江苏省的经济会继续保持中高速增长，进而增加碳排放总量。

对强化低碳情景在万元工业增加值能耗增长率进行调整，带来了能源消耗量的显著下降，这说明了能源使用效率对于节能的重要影响。能源消耗量与 GDP 总量的正相关关系显著，充分表明了在今日的发展模式下资源节约与经济增长的矛盾关系。很难忽略这样一个事实，未来社会能源消耗总量随着经济增长的要求会进一步增加，但是能源消耗强度由于节能技术的提高也会随之下降。

发展情景与基准情景由于仅有 GDP 增长率的设定不同而形成鲜明的对照，低碳情景与强化低碳情景在工业能耗效率和产业结构方面做出了调整。从上述图形可以清楚地看到，发展情景的消耗量和排放量都高于其余情景，说明经济发展目标的设定是减排工作的核心部分。同时，尽管经济发展目标和人口规模的控制对于节能减排意义重大，仅通过控制经济和人口规模很难实现社会经济的可持续发展。因此，要实现更环保的社会经济发展，可以通过大力发展服务业和提高能源利用率等来实现。

5.4 市场化碳减排情景分析

碳交易子系统假定江苏省开放碳交易市场，并通过 GDP 等变量与传统子系统发生交互作用。基于此将 2020-2025 年的仿真结果与传统减排情景进行对比，探究碳交易对江苏省经济与能源的影响，如图 5-7 所示。

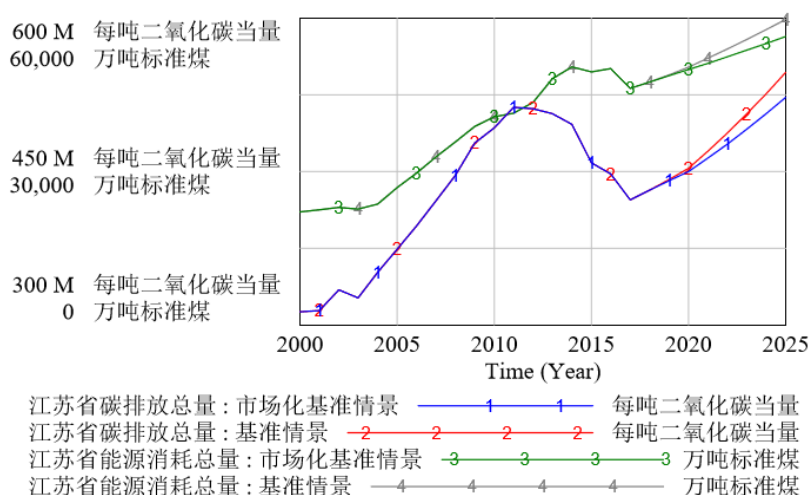


图 5-7 江苏省碳交易基准情景下能源需求与 CO₂ 排放趋势

以基准情景为例，碳交易行为会使得能源需求与排放量双双下降。在开展碳交易活动后，2025 年的能源需求量约为 56360 万吨，碳排放总量约为 522.3M 每吨 CO₂ 当量，分别比原基准情景下降 5.6% 和 4.5%。随着时间的推移，市场化碳减排的效果将越来越明显。碳排放量的减少一定程度上抑制了 GDP 的增长，但是 GDP 量上的变化小于碳排放的变化，说明碳交易活动对经济发展的负面影响较微弱。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论与政策启示

城市能源需求和碳排放的动态分析对于理解城市未来能源安全、能源管理、环保政策和投资决策等是非常重要的。为了预测江苏省未来五年的碳排放与能源需求情况，本文基于 Vensim 软件引入了江苏省碳排放 SD 模型，为有效规划江苏省能源与排放提供了思路。

模拟结果表明如今江苏省碳排放与能源需求量逐年升高，说明江苏省面临着节能减排的沉重负担，这也更加突出了节能减排的迫切性。基于现有经济指标的预测，预计到 2025 年江苏省碳排放将达到 570.5M 吨 CO₂ 当量，能源消耗量上升到 58210 万吨标准煤。结合江苏省“十三五”各项发展目标值，2025 年江苏省碳排放将达到 546.7M 吨 CO₂ 当量，能源消耗量为 59710 万吨标准煤。这说明政府的“十三五”计划是符合实际需要且兼顾环境保护与经济合理发展的合理发展目标。

模型通过了对于私家车年平均油耗、百公里公交平均油耗等常量的敏感性分析，说明模型具有较强的鲁棒性。这些常量的变化仅引起了模型的数值敏感，且在一定的范围内合理变动，是符合江苏省经济发展现实情况的。

在部门能源需求方面，工业、服务业和居民生活部门将继续主导能源需求的 90% 以上。随着近年来江苏省产业结构有意识地由“二三一”向“三二一”的转变，未来通过优化产业结构促使节能减排这一手段将大有可为。

在碳排放贡献者层面，工业部门在二氧化碳排放中所占的份额最大，其次是交通运输部门。运输部门的 CO₂ 排放量将快速增长，由于私家车保有量与公共交通里程的快速增长，使得交通业成为总体排放的另一个主要贡献者。居民生活部门的排放量显著下降主要得益于天然气在日常生活中的推广。第三产业的排放量占比不高，远低于其在能源消费中所占的份额，这是因为服务业消费的是相对清洁的能源类型。

在传统情景分析方面，这四个情景分别模拟了社会经济目标增长、快速增长、缓慢增长与强化缓慢增长。结果均显示未来江苏省碳排放与能源使用量呈现上升趋势，但其强度显著下降。越低碳的场景对经济的牺牲率也越大，但控制经济发展速度不是节能减排的唯一有效途径。

加入碳交易子系统的市场化碳减排情景分析说明碳交易市场的发展对于节能减排的影响是显著的。即使同样对经济造成一定的牺牲，但其对经济的副作用明显低于对碳减排的支持作用。正如经济学家尼古拉斯斯特恩所说，现在投入 GDP 的 1%，来日能避免气候变暖造成 5%-20% 的损失^[47]。

通过以上仿真模拟的结果，本文对江苏省节能减排提出如下建议：

- (1) 设定合理的经济目标，避免 GDP 锦标赛的发展方式。通过分析，经济

发展目标直接影响了各产业的增长情况与环境保护的强度，也是消耗量与排放量的第一影响要素。

(2) 尝试利用综合手段进行联合调控。根据第 5 章的分析，仅着眼于 GDP 与人口不能达到最佳的减排效果，能源使用效率的提高能够更有效地拓展可持续发展空间。

(3) 提倡结构性减排，倒逼产业结构优化升级。江苏省应结合自身现状，积极向着“三二一”模式进行转变，进一步提升经济发展的质量。

(4) 积极探索开发碳交易市场。即使失去了发展碳交易市场的先行者优势，但碳交易对于减排的效果是十分显著的。江苏省应主动响应国家积极建设碳市场这一号召，为自身未来碳交易市场的建设描绘蓝图。

6.2 不足之处及未来展望

在研究过程中受到学术水平和模型界限的限制，使得本文疏忽了一些层面的问题，主要表现在模型数据和变量方面。

首先，本文遵循“严格定义构件，努力度量他们”的原则，尽量为变量寻找数据来源。由于某些细节化的数据较难从官方年鉴中获得，例如第一产业煤消耗比重等，故根据其演进趋势采用表函数来表示。表函数的模糊性一定程度上影响了模型结果的准确性；其次，仅选用温室气体的代表——二氧化碳测算碳排放量，忽略了其他温室气体的影响。还有，模型只选用了七个部门参与碳排放的过程。虽然影响排放量的因素无法穷尽，但是外贸和电力生产等重要部门被忽略掉了。同时，子系统仅着眼于社会部门是如何增加碳排放量这一基础进行分析，未考虑可以直接减少碳排放的因素，诸如技术进步、城镇绿化面积和森林碳汇等。最后，虚拟碳交易系统和未经实际检验的碳交易影子价格的引入也对模型结果准确度提出了挑战。

从现有的分析可以预见江苏省未来的生存碳足迹。近年来江苏省政府出台了一系列未来发展碳交易市场的计划，其中考虑到发展碳交易市场和征收碳税的利弊。关于体现“使用者付费”思想的市场机制与体现“污染者付费”思想的碳税的实施效果在学术界产生了激烈的讨论，这对于扩充碳交易子系统从而展开更详尽的分析提供了机会与视角。

参考文献

- [1] 仲云云,张冲.低碳发展的国际碳减排博弈与中国对策[J].云南财经大学学报,2018,34(12):106-112.
- [2] 政府间气候变化专门委员会:《IPCC 新闻稿》,2018 年 10 月 8 日,
http://www.ipcc.ch/pdf/session48/pr_181008_P48_spm_zh.
- [3] 中国煤炭网:英国去煤化的道路是一本活体教科书.
<http://www.ccoalnews.com/201707/06/c17821.html>.
- [4] 气候变化国家评估报告编写委员会.气候变化国家评估报告[M].北京:科学出版社出版,2007:380-385.
- [5] Dhakal S. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications[J]. Energy Policy, 2009, 37(11):4208-4219.
- [6] 中国碳交易网.什么是碳排放的概念定义?[EB/OL].
<http://www.tanjiaoyi.com/article-7134-1.html?from=app>,2015-02-23/2019-05-04.
- [7] 肖皓,杨佳衡,乔晗.需求侧全球碳排放强度的度量及分解[J].系统工程理论与实践,2015,35(07):1646-1656.
- [8] 郭朝先.中国碳排放因素分解:基于 LMDI 分解技术[J].中国人口·资源与环境,2010,20(12):4-9.
- [9] 赵选民,卞腾锐.基于 LMDI 的能源消费碳排放因素分解——以陕西省为例[J].经济问题,2015(02):35-39.
- [10] 张旺,周跃云.北京能源消费排放 CO₂ 增量的分解研究——基于 IDA 法的 LMDI 技术分析[J].地理科学进展,2013,32(04):514-521.
- [11] 郝千婷,黄明祥,包刚.碳排放核算方法概述与比较研究[J].中国环境管理,2011(04):51-55.
- [12] 揭昌亮,王金龙,庞一楠.中国农业增长与化肥面源污染:环境库兹涅茨曲线存在吗?[J].农村经济,2018(11):110-117.
- [13] 刘海英,安小甜.环境税的工业污染减排效应——基于环境库兹涅茨曲线(EKC)检验的视角[J].山东大学学报(哲学社会科学版),2018(03):29-38.
- [14] Kaika D , Zervas E . The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory—Part A: Concept, causes and the CO₂ emissions case[J]. Energy Policy, 2013, 62(5):1392-1402.
- [15] 全世文,袁静婷.我国经济增长与碳排放之间的变协整与阈值效应[J].改革,2019(02):37-45.
- [16] 李健,王尧,王颖.天津市碳排放脱钩态势及碳减排潜力分析——基于 2007—2016 年的面板数据[J].生态经济,2019,35(04):26-32.
- [17] 张志高,袁征,张翠贞,庞菲菲,王少利,肖振华,张玉.河南省农业碳排放时空特征与脱钩弹性研究[J].江苏农业科学,2017,45(17):281-285.
- [18] 杨恺钧,杨甜甜.老龄化、产业结构与碳排放——基于独立作用与联动作用的双重视角[J].工业技术经济,2018,37(12):115-123.

- [19] 庞庆华,杨田田,李涵.城市碳排放、产业结构和区域创新的空间联系——基于江苏省 13 个地级市的数据分析[J].华东经济管理,2018,32(12):20-26.
- [20] Kofi Adom P , Bekoe W , Amuakwamensah F , et al. Carbon dioxide emissions, economic growth, industrial structure, and technical efficiency: Empirical evidence from Ghana, Senegal, and Morocco on the causal dynamics[J]. Energy, 2012, 47(1):314-325.
- [21] 徐成龙,任建兰,巩灿娟.产业结构调整对山东省碳排放的影响[J].自然资源学报,2014,29(02):201-210.
- [22] 董明涛.我国农业碳排放与产业结构的关联研究[J].干旱区资源与环境,2016,30(10):7-12.
- [23] 侯东民.温室效应:人口要负多大责任?[J].人口研究,2010,34(01):70-74.
- [24] 刘露.江苏省城镇化对碳排放影响的研究[D].中国矿业大学,2016.
- [25] 徐丽,曲建升,李恒吉,曾静静,张洪芬.中国居民能源消费碳排放现状分析及预测研究[J].生态经济,2019,35(01):19-23+29.
- [26] Yin Long, Yoshikuni Yoshida, Liang Dong. Exploring the indirect household carbon emissions by source: Analysis on 49 Japanese cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 167:571-581.
- [27] Lili Du, Xianzhe Li, Haijun Zhao, Weichun Ma, Ping Jiang. System dynamic modeling of urban carbon emissions based on the regional National Economy and Social Development Plan: A case study of Shanghai city[J]. Journal of Cleaner Production,2018,172:1501-1513.
- [28] 蔡婉华,叶阿忠.交通运输、经济增长与碳排放之间的互动关系研究——基于 PVAR 模型[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(03):26-31.
- [29] 庄颖,夏斌.广东省交通碳排放核算及影响因素分析[J].环境科学研究,2017,30(07):1154-1162.
- [30] 程铁信,李奇,赵颖.考虑碳排放的城市交通拥堵定价模型及其仿真分析[J].中国管理科学,2016,24(S1):932-937.
- [31] 李宾,周俊.交通拥堵的碳排放效应——以湘潭市大桥饭店路口为例[J].城市问题,2017(06):46-51.
- [32] 王璟珉,窦晓铭,季芮虹.碳排放权交易机制对全球气候治理有效性研究——低碳经济学术前沿进展[J].山东大学学报(哲学社会科学版),2019(02):174-184.
- [33] 冯登艳.国内外碳排放市场建设经验及对河南省的启示[J].征信,2018,36(07):59-65.
- [34] 赵立祥,张雪红.基于文献计量的个人碳交易研究态势分析[J].科技管理研究,2019,39(01):225-234.
- [35] 王勇,赵晗.中国碳交易市场启动对地区碳排放效率的影响[J].中国人口·资源与环境,2019,29(01):50-58.
- [36] 程永伟,穆东,佟雯.碳交易市场动力学模型及其应用:以广东省为例[J].系统科学与数学,2017,37(02):383-392.
- [37] Perdan S , Azapagic A . Carbon trading: Current schemes and future developments[J].

- Energy Policy, 2011, 39(10):6040-6054.
- [38] Meadows H. et al. The Limits to Growth[M]. New York University Books, 1972.
- [39] Carlos Casanova. 碳交易：中国碳排放影子价格的研究[D].南京大学,2011.
- [40] 世界银行. 1992 年世界发展报告 发展与环境[M]. 中国财政经济出版社,1992.
- [41] Selin Özokcu , Özlem Özdemir. Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,72:639-647.
- [42] 江苏省统计局 . 江苏省城镇化水平居全国第五位 [EB/OL].http://www.jiangsu.gov.cn/art/2019/3/11/art_34153_8259502.html,2019-03-11/2019-05-04.
- [43] 江苏人大 . 江苏省国民经济和社会发展 “ 十三五 ” 发展规划纲要 [EB/OL].http://www.jsrd.gov.cn/huizzl/qgrdh/20181301/sycy/201802/t20180227_491059.shtml,2016-03-03/2019-05-04.
- [44] 江苏省林业局 . 江苏省林业发展 “ 十三五 ” 规划 [EB/OL]. http://lyj.jiangsu.gov.cn/art/2018/2/6/art_48230_7481204.html,2018-02-06/2019-05-04.
- [45] 江苏省人民政府 . 江苏省 “ 十三五 ” 能源发展规划 [EB/OL]. http://www.jiangsu.gov.cn/art/2017/5/22/art_46484_2557495.html,2017-05-22/2019-05-04.
- [46] 碳排放交易网. 广东省碳市场 2016 年度碳排放配额发放总数量约 3.86 亿吨 [EB/OL]. <http://www.tanpaifang.com/tanzhibiao/201612/1757969.html>,2016-12-17/2019-05-04.
- [47] 经济观察网 . “ 低碳经济 ” 概念的由来 [EB/OL].<http://www.eeo.com.cn/zt/dtcsbd/zjgd/2010/05/18/170361.shtml>,2010-05-18/2019-05-04.

附录： SD 模型子系统变量及函数关系

表 1-1 社会经济子系统变量表

序号	变量	类型	单位	备注
1	GDP	水平变量	亿人民币	
2	GDP 增长	速率变量	亿人民币	
3	GDP 增长率	辅助变量	——	
4	GDP 增长率表函数	表函数	——	
5	总人口	水平变量	万	常住居民
6	人口增长	速率变量	万	
7	人口增长率	辅助变量	——	
8	人口增长率表函数	表函数	——	
9	人均 GDP	辅助变量	人民币元	
10	人口城镇化率	辅助变量	——	非农村人口占总人口的比例
11	固定资产投资	辅助变量	亿人民币	
12	固定资产投资占 GDP 比重表函数	辅助变量	——	
13	第一产业增加值	辅助变量	亿人民币	
14	第二产业增加值	辅助变量	亿人民币	
15	第三产业增加值	辅助变量	亿人民币	
16	第一产业增加值占 GDP 比重	辅助变量	——	
17	第二产业增加值占 GDP 比重	辅助变量	——	
18	第三产业增加值占 GDP 比重	辅助变量	——	
19	第二产业增加值占 GDP 比重表函数	表函数	——	
20	第三产业增加值占 GDP 比重表函数	表函数	——	
21	人均消费和支出	辅助变量	人民币元	

表 1-2 第一产业子系统变量表

序号	变量	类型	单位	备注
1	第一产业增加值能耗表函数	表函数	——	
2	第一产业增加值能耗	辅助变量	吨标准煤/万人民币	
3	第一产业最终能源消耗总量	辅助变量	万吨标准煤	
4	第一产业煤消耗比重表函数	表函数	——	
5	第一产业汽油消耗比重表函数	表函数	——	
6	第一产业柴油消耗比重表函数	表函数	——	
7	第一产业煤消耗量	辅助变量	万吨	
8	第一产业汽油消耗量	辅助变量	万吨	
9	第一产业柴油消耗量	辅助变量	万吨	
10	第一产业最终能源消耗碳排放量	辅助变量	每吨二氧化碳当量	

表 1-3 第二产业子系统变量表

序号	变量	类型	单位	备注
1	工业增加值	辅助变量	亿人民币	
2	第二产业增加值表函数	表函数	——	
3	万元工业增加值能耗增长率表函数	表函数	——	
4	万元工业增加值能耗增长	速率变量	吨标准煤/万人民币	
5	万元工业增加值能耗	水平变量	吨标准煤/万人民币	
6	工业最终能源消耗总量	辅助变量	万吨标准煤	
7	原煤消耗量	辅助变量	万吨标准煤	
8	焦炭消耗量	辅助变量	万吨标准煤	
9	柴油消耗量	辅助变量	万吨标准煤	
10	燃油消耗量	辅助变量	万吨标准煤	
11	液化石油气消耗量	辅助变量	万吨标准煤	
12	天然气消耗量	辅助变量	万吨标准煤	
13	原煤占工业最终能源消耗总量比例表函数	表函数	——	
14	焦炭占工业最终能源消耗总量比例表函数	表函数	——	
15	柴油占工业最终能源消耗总量比例表函数	表函数	——	
16	燃油占工业最终能源消耗总量比例表函数	表函数	——	
17	液化石油气占工业最终能源消耗总量比例表函数	表函数	——	
18	天然气占工业最终能源消耗总量比例表函数	表函数	——	
19	工业碳排放量	辅助变量	每吨二氧化碳当量	
20	水泥产量	辅助变量	万吨	
21	煤渣产量	辅助变量	万吨	
22	水泥产品二氧化碳排放量	辅助变量	每吨二氧化碳当量	
23	生铁产量	辅助变量	万吨	
24	粗钢产量	辅助变量	万吨	
25	成品钢产量	辅助变量	万吨	
26	钢产品二氧化碳排放量	辅助变量	每吨二氧化碳当量	
27	乙烯产量表函数	表函数	万吨	
28	乙烯产品二氧化碳排放量	辅助变量	每吨二氧化碳当量	

表 1-4 第三产业子系统变量表

序号	变量	类型	单位	备注
1	第三产业单位增加值表函数	表函数	吨标准煤/万人民币	
2	第三产业最终能源消耗总量	辅助变量	万吨标准煤	
3	第三产业原煤消费量	辅助变量	万吨	
4	第三产业燃油消费量	辅助变量	万吨	
5	第三产业汽油消费量	辅助变量	万吨	
6	第三产业煤油消费量	辅助变量	万吨	
7	第三产业柴油消费量	辅助变量	万吨	
8	第三产业天然气消费量	辅助变量	万吨	
9	第三产业原煤消费比例表函数	表函数	——	
10	第三产业燃油消费比例表函数	表函数	——	
11	第三产业汽油消费比例表函数	表函数	——	
12	第三产业煤油消费比例表函数	表函数	——	
13	第三产业柴油消费比例表函数	表函数	——	
14	第三产业天然气消费比例表函数	表函数	——	
15	第三产业碳排放量	辅助变量	每吨二氧化碳当量	

表 1-5 居民子系统变量表

序号	变量	类型	单位	备注
1	居民最终能源消费总量	辅助变量	万吨标准煤	
2	私家车年耗油量	辅助变量	万吨标准煤	
3	居民原煤消耗	辅助变量	万吨标准煤	
4	居民汽油消耗	辅助变量	万吨标准煤	
5	居民天然气消耗	辅助变量	万吨标准煤	
6	居民原煤消耗比例表函数	表函数	——	
7	居民汽油消耗比例表函数	表函数	——	
8	居民天然气消耗比例表函数	表函数	——	
9	居民碳排放量	辅助变量	每吨二氧化碳当量	

表 1-6 交通子系统变量表

序号	变量	类型	单位	备注
1	私家车保有量	辅助变量	万	
2	私家车年平均油耗	常量	吨/年	
3	公交线路长度	表函数	公里	
4	公交里程	辅助变量	亿公里	
5	百公里公交平均油耗	常量	吨/百公里	
6	出租车数量	表函数	——	
7	出租车里程	辅助变量	亿公里	
8	百公里出租车平均油耗	常量	吨/百公里	
9	私家车碳排放	辅助变量	每吨二氧化碳当量	
10	公交车碳排放	辅助变量	每吨二氧化碳当量	
11	出租车碳排放	辅助变量	每吨二氧化碳当量	
12	交通碳排放	辅助变量	每吨二氧化碳当量	

表 1-7 碳交易子系统变量表

序号	变量	类型	单位	备注
1	配额总量减少率	常量	——	
2	配额总量减少	速率变量	万吨	
3	配额总量	水平变量	万吨	
4	碳交易量	辅助变量	万吨	
5	免费配额量	常量	万吨	
6	免费比例	常量	——	
7	惩罚	辅助变量	万吨	
8	碳排放成本	辅助变量	亿人民币	
9	碳交易价格	常量	亿人民币/万吨	
10	惩罚价格	常量	亿人民币/万吨	
11	利润	辅助变量	亿人民币	

表 1-8 社会经济子系统函数

变量	函数
GDP	GDP=INTEG(GDP 增长,8553.69)
GDP 增长	GDP 增长=GDP* GDP 增长率
GDP 增长率	GDP 增长率= GDP 增长率表函数(Time)
GDP 增长率表函数	GDP 增长率表函数 =LOOKUP{[(2000,0)-(2025,1)],(2000,0.11),(2001,0.12),(2002,0.15),(2003,0.21),(2004,0.23),(2005,0.25),(2006,0.21),(2007,0.2),(2008,0.1),(2009,0.13),(2010,0.13),(2011,0.13),(2012,0.12),(2013,0.13),(2014,0.12),(2015,0.08),(2016,0.07),(2017,0.07) }
总人口	总人口=INTEG(人口增长,7327)
人口增长	人口增长=总人口*人口增长率
人口增长率	人口增长率 =人口增长率表函数(Time)
人口增长率表函数	人口增长率表函数 =LOOKUP{[(2000,0)-(2017,0.1)],(2000,0.0158),(2001,0.0043),(2002,0.0064),(2003,0.007),(2004,0.0087),(2005,0.0087),(2006,0.0089),(2007,0.0088),(2008,0.0051),(2009,0.0062),(2010,0.0076),(2011,0.0037),(2012,0.0027),(2013,0.0025),(2014,0.0026),(2015,0.002),(2016,0.0028),(2017,0.0038) }
人均 GDP	人均 GDP =GDP/总人口*10000
人口城镇化率	人口城镇化率=EXP(0.123*LN(人均 GDP)-1.517), R ² =0.913, p-value=0.000
固定资产投资	固定资产投资=GDP*固定资产投资占 GDP 比重表函数
固定资产投资占 GDP 比重表函数	固定资产投资占 GDP 比重表函数 =WITHLOOKUP[Time,lookup([(2000,0)-(2017,1)],(2000,0.350192),(2001,0.349267),(2002,0.362901),(2003,0.428824),(2004,0.45106),(2005,0.465638),(2006,0.458509),(2007,0.466505),(2008,0.480234),(2009,0.54279),(2010,0.552384),(2011,0.52839),(2012,0.577651),(2013,0.592668),(2014,0.628153),(2015,0.643926),(2016,0.637963),(2017,0.616992))]
第一产业增加值	第一产业增加值=GDP*第一产业增加值占 GDP 比重
第二产业增加值	第二产业增加值=GDP*第二产业增加值占 GDP 比重
第三产业增加值	第三产业增加值=GDP*第三产业增加值占 GDP 比重
第一产业增加值占 GDP 比重	第一产业增加值占 GDP 比重=1-第二产业增加值占 GDP 比重-第三产业增加值占 GDP 比重
第二产业增加值占 GDP 比重	第二产业增加值占 GDP 比重=第二产业增加值占 GDP 比重表函数(Time)
第三产业增加值占 GDP 比重	第三产业增加值占 GDP 比重=第三产业增加值占 GDP 比重表函数(Time)
第二产业增加值占 GDP 比重表函数	第二产业增加值占 GDP 比重表函数 =LOOKUP{[(2000,0)-(2017,1)],(2000,0.518594),(2001,0.518932),(2002,0.528384),(2003,0.545462),(2004,0.563984),(2005,0.567863),(2006,0.567246),(2007,0.558883),(2008,0.552032),(2009,0.542482),(2010,0.528975),(2011,0.517859),(2012,0.506875),(2013,0.492292),(2014,0.479845),(2015,0.463337),(2016,0.447348),(2017,0.449993)}
第三产业增加值占 GDP 比重表函数	第三产业增加值占 GDP 比重表函数 =LOOKUP{[(2000,0)-(2017,2)],(2000,0.358846),(2001,0.365333),(2002,0.366925),(2003,0.361115),(2004,0.345668),(2005,0.35427),(2006,0.362414),(2007,0.37205),(2008,0.381001),(2009,0.392731),(2010,0.410505),(2011,0.420601),(2012,0.430849),(2013,0.450556),(2014,0.465215),(2015,0.48075),(2016,0.499967),(2017,0.502549)}
人均消费和支出	人均消费和支出=EXP(2.949+0.726*LN(GDP)), R ² =0.991, p-value=0.000

表 1-9 第一产业子系统函数

变量	函数
第一产业增加值能耗表函数	第一产业增加值能耗表函数 =LOOKUP{[(2000,0)-(2017,3)],(2000,1.02591),(2001,0.968704),(2002,1.4869),(2003,1.25684),(2004,1.23321),(2005,1.31575),(2006,1.34807),(2007,1.45949),(2008,1.3696),(2009,1.38028),(2010,1.29838),(2011,0.6807),(2012,0.630636),(2013,0.596033),(2014,0.561807),(2015,0.550958),(2016,0.55611),(2017,0.5)}
第一产业增加值能耗	第一产业增加值能耗=第一产业增加值能耗表函数(Time)
第一产业最终能源消耗总量	第一产业最终能源消耗总量=第一产业增加值能耗*第一产业增加值
第一产业煤消耗比重表函数	第一产业煤消耗比重表函数 =WITHLOOKUP{Time,[(2000,0)-(2017,0.2)],(2001,0.03),(2003,0.0476814),(2005,0.0688575),(2006,0.0811902),(2007,0.0922487),(2008,0.096202),(2009,0.080503),(2010,0.120033),(2011,0.122268),(2012,0.0954912),(2013,0.083791),(2014,0.135908),(2015,0.0235354),(2016,0.025),(2017,0.0249802))}
第一产业汽油消耗比重表函数	第一产业汽油消耗比重表函数 =WITHLOOKUP{Time,[(2000,0)-(2017,1)],(2000,0.29),(2001,0.3),(2002,0.32),(2003,0.31),(2004,0.33),(2005,0.33),(2006,0.28),(2007,0.44),(2008,0.41),(2009,0.4),(2012,0.38),(2017,0.4))}
第一产业柴油消耗比重表函数	第一产业柴油消耗比重表函数 =WITHLOOKUP{Time,[(2000,0)-(2017,1)],(2000,0.12),(2003,0.14909),(2004,0.262814),(2005,0.267342),(2006,0.293788),(2007,0.299121),(2008,0.314481),(2009,0.380914),(2010,0.381866),(2011,0.364047),(2012,0.432087),(2013,0.659063),(2014,0.589145),(2015,0.521627),(2016,0.303907),(2017,0.27))}
第一产业煤消耗量	第一产业煤消耗量=第一产业煤消耗比重表函数*第一产业最终能源消耗总量/0.7143
第一产业汽油消耗量	第一产业汽油消耗量=第一产业最终能源消耗总量*第一产业汽油消耗比重表函数/1.4714
第一产业柴油消耗量	第一产业柴油消耗量=第一产业最终能源消耗总量*第一产业柴油消耗比重表函数/1.4571
第一产业最终能源消耗碳排放量	第一产业最终能源消耗碳排放量=(第一产业煤消耗量*209.08*27.35*0.84+第一产业汽油消耗量*448*18.9*0.98+第一产业柴油消耗量*433.3*20.2*0.98)*44/12

表 1-10 第二产业子系统函数

变量	函数
工业增加值	工业增加值=第二产业增加值*二次产业增加值
二次产业增加值	二次产业增加值=二次产业增加值表函数(Time)
二次产业增加值表函数	二次产业增加值表函数 =LOOKUP{[(2000,0.5)-(2017,1)],(2000,0.935496),(2001,0.921651),(2002,0.909859),(2003,0.901292),(2004,0.892248),(2005,0.900909),(2006,0.905478),(2007,0.901614),(2008,0.90298),(2009,0.916554),(2010,0.923212),(2011,0.921403),(2012,0.920593),(2013,0.925214),(2014,0.916355),(2015,0.901191),(2016,0.905503),(2017,0.89)}
万元工业增加值能耗增长率表函数	万元工业增加值能耗增长率表函数 =WITHLOOKUP{ Time,([(2000,-1)-(2017,1)],(2000,-0.056273),(2001,-0.0720211),(2002,-0.136097),(2003,-0.125814),(2004,0.0197105),(2005,-0.0743407),(2006,-0.0491668),(2007,-0.0614177),(2008,0.0171693),(2009,-0.0824995),(2010,-0.0484778),(2011,-0.0484778),(2014,-0.0592),(2015,-0.0779),(2016,-0.0468),(2017,-0.0554))}
万元工业增加值能耗增长	万元工业增加值能耗增长=万元工业增加值能耗*万元工业增加值能耗增长率表函数
万元工业增加值能耗	万元工业增加值能耗==INTEG(万元工业增加值能耗增长,1.89)
工业最终能源消耗总量	工业最终能源消耗总量=万元工业增加值能耗*工业增加值
原煤消耗量	原煤消耗量=工业最终能源消耗总量*原煤占工业最终能源消耗总量比例表函数/0.7143
焦炭消耗量	焦炭消耗量=工业最终能源消耗总量*焦炭占工业最终能源消耗总量比例表函数/0.9714
柴油消耗量	柴油消耗量=工业最终能源消耗总量*柴油占工业最终能源消耗总量比例表函数/1.4571
燃油消耗量	燃油消耗量=工业最终能源消耗总量*燃油占工业最终能源消耗总量比例表函数/1.4286
液化石油气消耗量	液化石油气消耗量=工业最终能源消耗总量*液化石油气占工业最终能源消耗总量比例表函数/1.7143
天然气消耗	天然气消耗=工业最终能源消耗总量*天然气占工业最终能源消耗总量比例表函数/1.328/10
原煤占工业最终能源消耗总量比例表函数	原煤占工业最终能源消耗总量比例表函数 =WITHLOOKUP{ Time,([(2000,0)-(2017,0.5)],(2000,0.17),(2002,0.160375),(2004,0.16),(2006,0.13),(2008,0.123641),(2010,0.12532),(2012,0.12),(2013,0.1),(2014,0.104819),(2015,0.106214),(2016,0.109694),(2017,0.1))}
焦炭占工业最终能源消耗总量比例表函数	焦炭占工业最终能源消耗总量比例表函数 =WITHLOOKUP{ Time,([(2000,0)-(2017,0.5)],(2001,0.2),(2002,0.191852),(2004,0.17735),(2005,0.152738),(2006,0.142846),(2007,0.1288),(2008,0.122699),(2009,0.119816),(2011,0.125151),(2013,0.12209),(2015,0.118952),(2017,0.1))}
柴油占工业最终能源消耗总量比例表函数	柴油占工业最终能源消耗总量比例表函数 =WITHLOOKUP{ Time,([(2000,0)-(2017,0.1)],(2001,0.014),(2002,0.0147844),(2004,0.0163201),(2006,0.0125306),(2008,0.0142986),(2010,0.0184713),(2012,0.0197732),(2013,0.02),(2014,0.0177362),(2015,0.0163825),(2016,0.0197232),(2017,0.025))}
燃油占工业最终能源消耗总量比例表函数	燃油占工业最终能源消耗总量比例表函数 =WITHLOOKUP{ Time,([(2000,0)-(2017,0.1)],(2000,0.08),(2003,0.0661118),(2005,0.0545432),(2007,0.0440636),(2009,0.0548238),(2010,0.05),(2011,0.0407063),(2012,0.0390182),(2013,0.0338917),(2014,0.024489),(2015,0.0194727),(2016,0.0191116),(2017,0.01))}
液化石油气占工业最终能源消耗总量比例表函数	液化石油气占工业最终能源消耗总量比例表函数 =WITHLOOKUP{([(2000,0)-(2017,0.2)],(2000,0.0065),(2002,0.00756286),(2004,0.0178099),(2005,0.0185741),(2006,0.0192734),(2007,0.0165168),(2008,0.0143566),(2009,0.0163465),(2010,0.0145095),(2011,0.0166412),(2012,0.0179879),(2017,0.018))}

天然气占工业最终能源消耗总量比例表函数	天然气占工业最终能源消耗总量比例表函数 =WITHLOOKUP{Time,([(2000,0)-(2017,0.1)],(2000,0),(2001,0),(2003,0.00159085),(2005,0.00303629),(2007,0.00398097),(2009,0.0117562),(2010,0.0195787),(2011,0.0248913),(2012,0.026281),(2013,0.0263431),(2014,0.0275923),(2015,0.0403253),(2017,0.05))}
水泥产量	水泥产量=1402.2-43.142*LN(固定资产投资)+2208.6*LN(人口城镇化率), $R^2=0.856$, p-value=0.000
煤渣产量	煤渣产量=(0.786*0.29*(Time-1989))* 水泥产量
水泥产品二氧化碳排放量	水泥产品二氧化碳排放量=煤渣产量*0.5286*10000
生铁产量	生铁产量=EXP(5.463+0.251*LN(固定资产投资)+0.909*LN(人口城镇化率)), $R^2=0.907$, p-value=0.000
粗钢产量	粗钢产量=EXP(2.608+0.671*LN(生铁产量)), $R^2=0.976$, p-value=0.000
成品钢产量	成品钢产量=-14813.3+2221.9*LN(粗钢产量), $R^2=0.879$, p-value=0.000
钢产品二氧化碳排放量	钢产品二氧化碳排放量=(粗钢产量*(0.177*0.42938+0.091*0.42727)+(生铁产量*4.275/100-成品钢产量*0.24/100)*44/12)*10000
乙烯产量表函数	乙烯产量表函数 =WITHLOOKUP{Time,([(2000,0)-(2017,400)],(2000,43.43),(2001,40.55),(2002,48.08),(2003,76.53),(2004,81.76),(2005,111.71),(2006,140.17),(2007,145.59),(2008,134.78),(2009,141.6),(2010,121.47),(2011,153.9),(2012,132.50),(2013,145.9),(2014,152.7),(2015,154.3),(2016,162.95),(2017,145.3))}
乙烯产品二氧化碳排放量	乙烯产品二氧化碳排放量=乙烯产量表函数*1.73*1.3*10000
工业碳排放量	工业碳排放量=水泥产品二氧化碳排放量+钢产品二氧化碳排放量+乙烯产品二氧化碳排放量+(原煤消耗量*209.08*0.84*27.35+柴油消耗量*433.3*0.98*20.2+焦炭消耗量*284.41*0.94*28.84+燃油消耗量*401.9*0.98*21.1+液化石油气消耗量*473.1*0.98*17.2+天然气消耗量*3893.1*0.99*15.32)*44/12

表 1-11 第三产业子系统函数

变量	函数
第三产业单位增加值表函数	第三产业单位增加值表函数 =WITHLOOKUP{ Time,([(2000,0)-(2017,2)],(2000,1.48952),(2001,1.28441),(2002,0.991643),(2003,0.793997),(2004,0.674255),(2005,0.57641),(2006,0.503312),(2007,0.462774),(2008,0.429894),(2009,0.43001),(2010,0.447286),(2011,0.429065),(2012,0.407442),(2013,0.492189),(2014,0.47088),(2015,0.370728),(2016,0.363757),(2017,0.25))}
第三产业最终能源消耗总量	第三产业最终能源消耗总量= 第三产业增加值*第三产业单位增加值表函数
第三产业原煤消费量	第三产业原煤消费量=第三产业最终能源消耗总量*第三产业原煤消费比例表函数/0.7143
第三产业燃油消费量	第三产业燃油消费量=第三产业最终能源消耗总量*第三产业燃油消费比例表函数/1.4286
第三产业汽油消费量	第三产业汽油消费量=第三产业最终能源消耗总量*第三产业汽油消费比例表函数/1.4714
第三产业煤油消费量	第三产业煤油消费量=第三产业最终能源消耗总量*第三产业煤油消费比例表函数/1.4714
第三产业柴油消费量	第三产业柴油消费量=第三产业最终能源消耗总量*第三产业柴油消费比例表函数/1.4571
第三产业天然气消费量	第三产业天然气消费量=第三产业最终能源消耗总量*第三产业天然气消费比例表函数/1.328/10
第三产业原煤消费比例表函数	第三产业原煤消费比例表函数 =WITHLOOKUP{ Time,([(2000,0)-(2017,0.05)],(2000,0),(2002,0),(2003,0.0016),(2004,0.0018),(2005,0.0021),(2006,0.0027),(2007,0.0038),(2008,0.0058),(2009,0.0053),(2010,0.0063),(2011,0.0153),(2012,0.016),(2013,0.0165),(2014,0.0169),(2015,0.0173),(2016,0.0176),(2017,0.0185))}
第三产业燃油消费比例表函数	第三产业燃油消费比例表函数 =WITHLOOKUP{ Time,([(2000,0)-(2017,0.05)],(2000,0.002),(2001,0.002),(2003,0.0018),(2004,0.0117),(2005,0.0203),(2006,0.0199),(2007,0.0086),(2008,0.0046),(2009,0.0052),(2010,0.0035),(2011,0.0042),(2012,0.0036),(2013,0.0031),(2014,0.0027),(2015,0.0024),(2016,0.0021),(2017,0.0018))}
第三产业汽油消费比例表函数	第三产业汽油消费比例表函数 =WITHLOOKUP{ Time,([(2000,0)-(2017,0.5)],(2000,0.0586),(2001,0.0586),(2002,0.0627),(2003,0.063),(2004,0.0633),(2005,0.0593),(2006,0.0486),(2007,0.0386),(2008,0.0298),(2009,0.0267),(2010,0.0405),(2011,0.0434),(2012,0.0458),(2013,0.0477),(2014,0.0493),(2015,0.0507),(2017,0.058))}
第三产业煤油消费比例表函数	第三产业煤油消费比例表函数 =WITHLOOKUP{ Time,([(2000,0)-(2017,0.01)],(2000,0.0016),(2001,0.0015),(2002,0.0014),(2003,0.0003),(2004,0.0012),(2005,0.0008),(2006,0.0004),(2007,0.0003),(2008,0.0002),(2009,0.0002),(2010,0.0001),(2013,0.0001),(2015,0),(2017,0))}
第三产业柴油消费比例表函数	第三产业柴油消费比例表函数 =WITHLOOKUP{ Time,([(2000,0)-(2017,0.2)],(2000,0.02),(2002,0.0237),(2003,0.0284),(2004,0.0295),(2005,0.0306),(2006,0.0334),(2007,0.0391),(2008,0.0397),(2009,0.0403),(2010,0.0316),(2011,0.0429),(2012,0.0498),(2013,0.0554),(2014,0.06),(2015,0.0638),(2016,0.0671),(2017,0.079))}
第三产业天然气消费比例表函数	第三产业天然气消费比例表函数 =WITHLOOKUP{ Time,([(2000,0)-(2017,0.2)],(2000,0.0126866),(2001,0.00370452),(2003,0.00968535),(2004,0.00296804),(2005,0.00774659),(2006,0.00893846),(2007,0.0104289),(2008,0.015284),(2009,0.0165488),(2010,0.0147253),(2017,0.017))}

第三产业碳排放量	第三产业碳排放量=(第三产业原煤消费量*209.08*0.84*27.35+第三产业柴油消费量*433.3*0.98*20.2+第三产业汽油消费量*448*0.98*18.9+第三产业煤油消费量*447.5*0.98*19.6+第三产业燃油消费量*401.9*0.98*21.1+第三产业天然气消费量*3893.1*0.99*15.32)*44/12
----------	---

表 1-12 居民子系统函数

变量	函数
居民最终能源消费总量	居民最终能源消费总量=EXP(-10.469+2.194*LN(人口)), $R^2=0.981$, p-value=0.000
私家车年耗油量	私家车年耗油量=私家车保有量*私家车年平均油耗
居民原煤消耗	居民原煤消耗=居民最终能源消费总量*居民原煤消耗比例表函数/0.7143
居民汽油消耗	居民汽油消耗=居民最终能源消费总量*居民汽油消耗比例表函数/1.4714-私家车年油耗量
居民天然气消耗	居民天然气消耗=居民最终能源消费总量*居民天然气消耗比例表函数/1.33/10
居民原煤消耗比例表函数	居民原煤消耗比例表函数 =WITHLOOKUP{Time,([(2000,0)-(2017,1)],(2000,0.34),(2001,0.324),(2002,0.386),(2003,0.371),(2006,0.542),(2008,0.558),(2010,0.609),(2011,0.38),(2012,0.33),(2014,0.21),(2015,0.28),(2017,0.2))}
居民汽油消耗比例表函数	居民汽油消耗比例表函数 =WITHLOOKUP{Time,([(2000,0)-(2017,1)],(2000,0.66),(2002,0.614),(2004,0.539),(2005,0.45),(2006,0.398),(2007,0.345),(2008,0.334),(2009,0.295),(2010,0.241),(2011,0.56),(2012,0.514),(2013,0.477),(2015,0.478),(2017,0.48))}
居民天然气消耗比例表函数	居民天然气消耗比例表函数 =WITHLOOKUP{Time,([(2000,0)-(2017,1)],(2000,0.00),(2001,0.00),(2003,0.001),(2004,0.009),(2005,0.035),(2006,0.06),(2008,0.108),(2009,0.117),(2010,0.149),(2011,0.432),(2012,0.483),(2013,0.521),(2015,0.62),(2017,0.653))}
居民碳排放量	居民碳排放量=(居民原煤消耗*209.08*0.84*27.35+居民汽油消耗*448*0.98*18.9+居民天然气消耗*1575.84*0.99*12.2)*44/12

表 1-13 交通子系统函数

变量	函数
私家车保有量	私家车保有量= $-21467.142+2271.705*\ln(\text{人均消费和支出})$, $R^2=0.998$, $p\text{-value}=0.000$
私家车年平均油耗	私家车年平均油耗=0.867
公交线路长度	公交线路长度 =WITHLOOKUP{Time,([(2000,0)-(2017,100000)],(2000,6896),(2001,7296),(2002,12397),(2003,14696),(2004,15888),(2005,18077),(2006,12121),(2007,16133),(2008,14657),(2009,18881),(2010,44941),(2011,50971),(2012,52887),(2013,53903),(2014,57734),(2015,63623),(2016,63982),(2017,69100))}
公交里程	公交里程=0.001*公交线路长度-0.517, $R^2=0.991$, $p\text{-value}=0.000$
百公里公交平均油耗	百公里公交平均油耗=0.0334
出租车数量	出租车数量 =WITHLOOKUP{Time,([(2000,0)-(2017,60000)],(2000,36603),(2001,41480),(2002,41933),(2003,40073),(2004,40746),(2005,41476),(2006,42032),(2007,44993),(2008,44708),(2009,52282),(2010,52957),(2011,53409),(2012,54464),(2013,56785),(2014,60712),(2015,61120),(2016,54521),(2017,53465))}
出租车里程	出租车里程= $-16.793+0.002*\text{出租车数量}$, $R^2=0.881$, $p\text{-value}=0.000$
百公里出租车平均油耗	百公里出租车平均油耗=0.00725
私家车碳排放	私家车碳排放=私家车保有量*私家车年平均油耗*31046.4
公交车碳排放	公交车碳排放=公交里程*百公里公交平均油耗*100*32107.5
出租车碳排放	出租车碳排放=出租车里程*百公里出租车平均油耗*100*31046.4
交通碳排放	交通碳排放=私家车碳排放+公交车碳排放+出租车碳排放

表 1-14 碳交易子系统函数

变量	函数
配额总量	配额总量=INTEG(配额总量减少,30000)
配额总量减少率	配额总量减少率=0.01
配额总量减少	配额总量减少=配额总量*配额总量减少率
配额总量	配额总量=配额总量-配额总量减少
碳交易量	碳交易量=配额总量-免费配额量
免费配额量	免费配额量=工业碳排放量*免费比例
免费比例	免费比例=0.6
惩罚	惩罚=工业碳排放量-免费配额量-碳交易量
碳排放成本	碳排放成本=惩罚*惩罚价格+碳交易价格*碳交易量
碳交易价格	碳交易价格= 4×10^{-5}
惩罚价格	惩罚价格= $4 \times 4 \times 10^{-5}$
利润	利润= $\text{EXP}(0.552 \cdot \text{LN}(\text{GDP}) + 1.61)$, $R^2=0.954$, p-value=0.000
配额总量减少率	配额总量减少率=0.01