

## 中国节能减排系统动力学模型及政策优化仿真

周雄勇<sup>1</sup>, 许志端<sup>1</sup>, 郝永勤<sup>2</sup>

(1. 厦门大学 管理学院, 厦门 361005; 2. 福州大学 经济与管理学院, 福州 350108)

**摘 要** 为考察并比较不同节能减排政策对能源消耗和污染物排放的影响作用, 从政府、经济、人口、科技、能源和环境等系统要素出发, 构建了节能减排系统动力学模型; 并以福建省为例, 确定模型参数及主要方程, 在各个子系统上分别赋予税收、金融、财政、环保、产业和科技等政策调控因子, 动态仿真不同政策的实施效果. 研究表明: 在设定的情景及参数下, 政策的调整与实施往往能够促进节能减排, 但不能盲目改变政策的实施力度. 不同政策其节能减排效果不同, 税收、环保和产业政策对节能减排产生的效果最为明显, 其中环保政策下环境相对污染度虽降幅不及税收政策, 但主要污染物的前端治污效果凸显; 而金融、财政和科技政策的节能减排效果较为微弱.

**关键词** 节能减排; 系统动力学; 政策仿真; 福建省

## The system dynamic model and policy optimized simulation of energy conservation and emission reduction in China

ZHOU Xiongyong<sup>1</sup>, XU Zhidian<sup>1</sup>, XI Yongqin<sup>2</sup>

(1. School of Management, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract** In order to investigate and compare the effect of different policies of energy-conservation and emission-reduction (ECER), this paper constructs a systematic model which affects the ECER, with elements such as government economy, population, technology, energy and environment, and takes Fujian province as a case to determine the parameters and main equations, while adds policy adjustment factors from tax, finance, fiscal, environmental protection, industry and science and technology on each subsystem via system dynamics to further simulate different policy instruments. The results show that: given scenarios and parameters, on the one hand, the adjustment and implementation of policies can often promote ECER, but we can not blindly change the implementation of policies. On the other hand, different policies have the distinct effectiveness of its ECER practice, specifically, the effect of taxation, environmental protection and industrial policy on ECER is significant where the front-end pollution control of main pollutant on environmental protection policy works well. By contrast, the financial, fiscal and technological policies effect of ECER is relatively weak.

**Keywords** energy conservation and emission reduction; system dynamics; policy simulation; Fujian province

收稿日期: 2017-03-09

**作者简介:** 周雄勇 (1991-), 男, 汉, 福建石狮人, 博士研究生, 研究方向: 可持续供应链, E-mail: 17720160153898@stu.xmu.edu.cn; 许志端 (1966-), 女, 汉, 福建德化人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 供应链与物流管理, 运作管理; 郝永勤 (1954-), 男, 汉, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 政府经济管理, 循环经济理论与实践.

**基金项目:** 国家自然科学基金 (71573114); 福建省社会科学规划项目 (FJ2015C123); 福建省软科学项目 (2016R0002); 福建省高校青年自然科学基金重点项目 (JZ160492)

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (71573114); The Program of Social Science Foundation of Fujian (FJ2015C123); The Soft Science Foundation of Fujian (2016R0002); Key Program of Natural Foundation in College Young Teachers of Fujian (JZ160492)

**中文引用格式:** 周雄勇, 许志端, 郝永勤. 中国节能减排系统动力学模型及政策优化仿真 [J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(6): 1422-1444.

**英文引用格式:** Zhou X Y, Xu Z D, Xi Y Q. The system dynamic model and policy optimized simulation of energy conservation and emission reduction in China[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2018, 38(6): 1422-1444.

## 1 引言

能源作为重要的战略储备资源,是人类生存和发展的关键物质基础,在保障国计民生、推动社会进步、维护国家稳定与发展等方面发挥着积极作用<sup>[1]</sup>。21世纪以来,随着工业化和城镇化的进程不断深入,尤其重工业和交通运输业迅猛发展,能源需求量急剧增加,经济发展所面临的能源约束矛盾和能源利用引起的环境问题十分突出。为应对环境污染和能源短缺的双重挑战,中央政府在“十一五规划纲要”(2006)中首次提出了“节能减排”的总体目标,并将其纳入国民经济的长期发展规划。2011年,在“十二五规划纲要”中,中央政府高度重视资源与环境建设,延续“两型社会”的蓝图,提出“全面推进节能减排”的重要决策。在“十三五规划纲要”(2016)中,“生态文明建设”的战略设计首次纳入其中,中央政府进一步提出要“创新开拓,完成节能减排目标”。可见,“节能减排”依然是新常态下亟需攻克的重要课题,在当前高度重视生态建设的时代背景下,节能减排更是推进生态文明、建设美丽中国的关键举措和重要路径。但是,值得思考的是,长达十年的节能减排工作,当前节能减排空间日渐缩小,增量依然较难控制,如何进一步提升能源节约和污染防治的能力,挖掘节能减排潜力,是当下面临的棘手问题。在节能减排空间有限时,政府的激励性措施和规制性手段往往被认为是有效的方法<sup>[2]</sup>,价格和环保收费、财政激励、金融支持和税收优惠是当前出台的主要政策工具,但是具体哪种政策更为有效?单政策视角下实施力度的改变会给节能减排带来何种效果?依然值得我们探讨。

国外对节能减排理论的研究可以追溯到20世纪70年代第二次石油危机的爆发所引发的对能源和环境的广泛思考。80年代末期,布伦特兰夫人在其研究报告《我们共同的未来》中首次提出“可持续发展”构想,把能源与环境问题上升到更广阔的研究层次。此后,学者们纷纷以不同学科交叉融合的视角来探究人类发展与生态平衡之间的联系<sup>[3,4]</sup>,能源与环境问题作为一项复杂的系统工程成为广泛共识。国内学术界在梳理和借鉴国外关于能源与环境研究成果的基础上,自20世纪80年代开始,陆续在资源开采与利用、环境污染治理与可持续发展等方面开展了因地制宜的研究,为节能减排相关理论的研究奠定了坚实的基础。而“节能减排”一词是在2006年中国出台的“十一五”规划纲要首次提出并确立的。学术界对“节能减排”的系统化研究,正是从此时开始并逐步涌现的,目前主要形成节能减排绩效/效率评价和政策效应评价两个领域。王兵和刘光天研究节能减排与中国绿色经济增长之间的关系,通过全要素生产率衡量节能减排绩效,指出节能减排潜力的挖掘依赖于经济的革新,而区域差别化的节能减排政策能够推进绿色经济发展<sup>[5]</sup>。段文斌等学者基于产业异质性,考察不同产业在技术选择上如何提高节能和减排效率,并提出了各类产业的合理技术手段<sup>[6]</sup>。张丹等学者通过建立计量模型,对中国30个省域的节能减排绩效进行测度并探析其驱动因素,认为低节能区域的影响因素往往是经济增长水平<sup>[7]</sup>。程时雄等学者进一步具体化节能减排的绩效测度问题,利用中国工业行业28年的面板数据研究工业节能减排对经济的影响,认为环境技术效率的提升提高了节能减排能力并进一步地促进经济增长<sup>[8]</sup>。金桂荣和张丽以及曹春辉等学者从企业角度考虑节能减排问题,通过衡量企业的节能减排效率,进一步探寻其影响因素,认为企业节能减排的行为策略可分为主动型和反映型<sup>[9,10]</sup>。

在政策评价领域,Lo和Wang,Yuan等学者探析了中国在过去的“十一五”和“十二五”期间所面临的节能减排瓶颈,并梳理出这十年出台的节能减排政策及其待完善问题<sup>[11,12]</sup>。张国兴等学者认为当前中国的节能减排政策虽然多,但是其政策力度和效果不显著,同时节能减排政策的制定缺乏足够的战略和系统性,应从部门和目标协同的方式对政策进行重新梳理<sup>[13]</sup>。在具体的节能减排政策工具上,财政补贴是中国推进节能减排中运用最为广泛的政策之一,Burt和Dargusch研究了其政策效果<sup>[14]</sup>,张国兴等学者探究了节能减排财政补贴程序中可能出现的违规、虚假和影响积极性的行为,通过信号博弈模型上考察其造假风险的均衡条件<sup>[15]</sup>。郭存芝和孙康认为税收优惠虽然会对节能减排有促进作用,但是由于其不具备约束性,实际政策效应有限<sup>[16]</sup>。徐晓亮等学者从煤炭资源税的角度研究行业和企业的节能减排问题,认为适度的煤炭资源税税率会促进减排,而采用10%的税率效果最佳<sup>[17]</sup>。Callan等学者进一步讨论碳税政策如何使用问题,其认为若想以碳税收入来减免税收并增加社会福利,单一使用部分碳税效果最好<sup>[18]</sup>。肖挺和刘华从产业结构的视角研究区域和产业的节能减排问题,认为产业结构均衡能够有效抑制工业碳排放<sup>[19]</sup>。于斌斌则通过从产业结构调整幅度和调整质量两个层次考察结构优化对区域能源效率的作用机理,认为东部地区能源效率的改善应以产业结构调整质量为基础<sup>[20]</sup>。王班班和齐绍洲研究市场型和命令型工具对节能减排技术创新的影响,

实证表明,市场型政策具有外溢性,而命令型政策的执行能力较高,实操性较强,应通过两类政策工具的协同和互补完善节能减排政策体系<sup>[21]</sup>。在金融政策上,修静等学者构建了绿色信贷与节能减排下工业增长之间的关系,认为绿色信贷规制举措促进工业部门进一步挖掘节能减排潜力<sup>[22]</sup>。邓平、戴胜利等学者从政府角度出发,提出构建一个与中国经济金融发展阶段和节能减排现状相适应的金融支持体系<sup>[23]</sup>。

综上所述,当前国内外学者对节能减排的研究,可能存在的不足在于:其一,节能减排是一个涉及经济、社会、科技、能源、政策、环境等多领域的复杂系统问题,然而目前对节能减排效率和效果的研究多以静态层面的实证评价和因素识别,缺乏从系统和演化的角度考察节能减排成效的动态变化。其二,多数文章主要集中于定性建立节能减排政策框架,而定量分析节能减排政策效果的文献较少。节能减排政策在定量研究中其效果是否符合预期,不同政策之间的政策效应是否一致,何种节能减排政策的政策效果最优等问题尚未得到有力解释。其三,政策评价研究较多,政策对节能减排的影响路径和效果有待清晰。当前研究仅对少数政策进行效应评估,无法预知各种政策工具的适用性,没有从模拟社会经济系统的角度考察政策实施的传导路径和现实效果,往往难以动态检验和“对症下药”,影响节能减排政策的科学制定。

由于节能减排的综合性和动态性,传统低阶和线性理论不利于有效解决这一复杂系统问题,为此,引入系统动力学方法,通过建构系统模型,模拟现实环境并仿真未来演化趋势能够较好地适用于节能减排问题的研究。程叶青等、王灵梅等、杨浩雄等和徐升华等学者均采用系统动力学方法解决可持续发展系统<sup>[24]</sup>、生态工业园系统<sup>[25]</sup>、城市交通<sup>[26]</sup>和生态集群产业问题<sup>[27]</sup>。唐丽敏等和黄飞等学者还通过系统动力学方法研究煤炭产业和物流业的节能减排系统问题。这些研究成果为把系统动力学用于研究社会经济系统问题提供方法论支持<sup>[28,29]</sup>。

为此,本文将运用系统动力学方法,尝试对上述所列研究“空白”层面进行探索,首先将从政府、经济、人口、科技、能源和环境等系统要素出发,建立节能减排系统动力系统,在各个子系统上分别赋予税收、金融、财政、环保等政策调控因子,继而考察和比较不同政策工具在系统中如何对不同层面的要素产生动态影响,讨论政策的有效性,以期更好地推动节能减排政策优化创新。

## 2 区域节能减排系统结构分析

### 2.1 模型边界分析与假设

节能减排是更为具体的社会经济系统。社会经济系统的范畴很广,包括可持续发展系统、资源承载力系统、区域/产业系统等其他耦合系统。传统的社会经济系统又称 3E (Energy-Economy-Environment) 系统,这三个子系统是能够反映社会平衡与协调发展的基本系统。在此基础上,结合不同的研究视角,社会经济系统的元素和关系进一步得到拓展,更多的耦合系统得以出现。其中,考察区域的社会经济状况,以“迈向 21 世纪门槛:国家可持续发展模型 (Threshold 21: National Sustainable Model)”深受学界认可<sup>[30]</sup>。基于中国情境,黄振中等学者借鉴并设计了中国可持续发展仿真模型,该模型边界包括社会、产业发展、资源、环境和经济五个方面十一个大模块<sup>[31]</sup>。国内学者根据这一模型边界进一步具体化,如程叶青等学者将区域可持续发展系统设定为经济、人口、资源与环境保护子系统的组合<sup>[24]</sup>;王灵梅等学者把火电厂生态工业园确定为人口、产业、环境资源和园区收入子系统构成<sup>[25]</sup>;潘婧等学者用港口、经济、人口、资源子系统组成港城耦合系统的边界<sup>[32]</sup>;徐升华和吴丹将鄱阳湖生态经济区的系统边界定义为经济、人力资本、科技水平、资源、生态企业和居民生活子系统的构成<sup>[27]</sup>;唐丽敏等以物流供需、经济和环境子系统来反映物流节能减排系统<sup>[28]</sup>。

作为一个复杂巨系统,节能减排拥有具体化的可持续发展模型特征,且其运行边界超出传统的 3E 系统本身,在借鉴已有成果的基础上,基于数据代表性、可获性和可操作性等原则,同时考虑了节能减排的综合影响作用,首先确立了经济、人口、科技、能源与环境这五个子系统边界,其中经济、人口和科技子系统为输入系统,能源与环境系统为考察目标的输出系统和成效的表现形式。再者,社会经济系统尤其是具有国家宏观战略属性的节能减排系统,贯穿了国家在每个系统的政策机制,出于考察节能减排政策对输出系统变量的作用,突出政府宏观调控作用,形成以政府子系统为核心的,经济、环境、人口、能源和科技等其他五个子系统相互影响的系统化模型。政府系统通过政策的“内生改进”对经济、能源和环境系统进行调控,将不同政策参数作为系统的输入值影响其他子系统,构成节能减排系统的运行枢纽。节能减排系统涵盖多个部门,涉及

大量的参数变量. 由于计算机容量及时间的限制, 对模型的边界进行适当限制. 图 1 反映了节能减排系统理论模型.

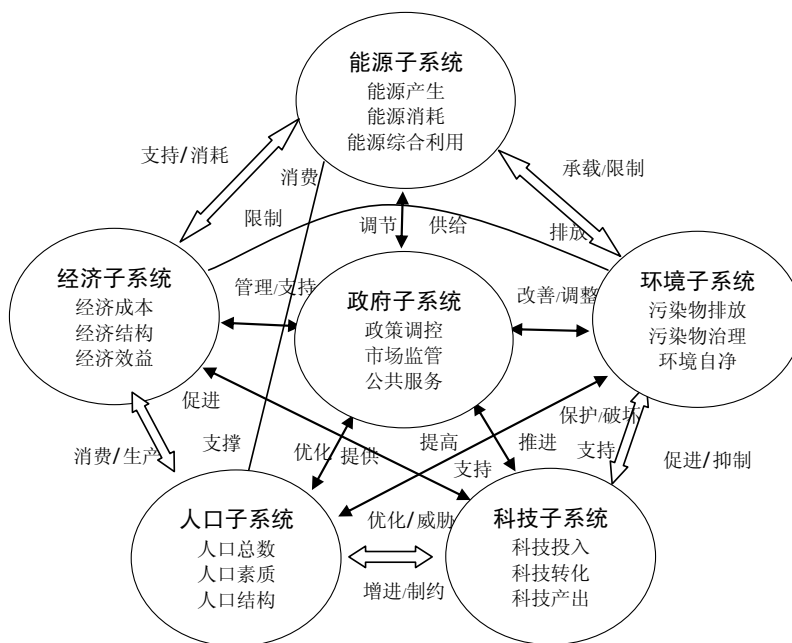


图 1 节能减排系统理论模型

节能减排系统涉及六个子系统, 影响因素众多, 难以样样俱到. 因此, 在明确研究目标的前提下, 引入一定的假设条件, 对无关全局的次要因素给予剔除, 重点考虑影响全局的主要因素, 从复杂的巨系统中剥离出关键的、对整个系统运行有重要影响作用的模型结构, 将抽象宏观的现实系统通过相互联系的变量和反馈结构予以具象化, 更有利于对节能减排系统的综合分析. 模型主要考虑以下假设: 1) 该模型偏向于考虑工业领域节能减排状况, 对农业和第三产业不直接涉及; 2) 假设经济稳定持续增长, 无较大经济波动; 3) 选取多个污染物排放指标作为衡量节能减排效果标量. 通过相关的能源环境指标进行梳理, 参考“十一五”、“十二五”规划纲要明确提出的约束性指标, 文章以化学需氧量 (下称 COD)、氨氮化物、固体废弃物、二氧化硫 (下称  $\text{SO}_2$ )、氮氧化物 (下称  $\text{NO}_x$ ) 排放指标来评价节能减排效果. 这五个指标数据较为全面, 且易于获取与比较.

## 2.2 子系统分析

1) 经济子系统, 主要研究经济总量和结构对能源与环境的影响关系. 系统中除了核心变量 GDP 外, 还包括固定资产、工业产值、环保投入、节能投入等其他经济要素. 系统模型从所确立的研究角度和目的出发, 假设经济总量的动态变化主要受人口增长、科技发展、能源消耗和生态环境状况的影响, 考察在这些因素发生变化的情况下应保持的合理经济增长水平; 同时, 经济子系统通过研发投入比例影响科技发展, 节能投资比例影响能源使用效率, 环保投入比重影响环境污染治理能力.

2) 人口子系统, 主要研究在一定的经济总量、能源消耗总量和生态环境状况的条件下, 所应保持的合理的人口总量. 系统以人口总量为水平变量, 出生人口、死亡人口、机械人口为速率变量, 其余变量为辅助变量或常量. 考虑人口总量在节能减排系统中的目的在于生活中的能源产品使用和污染物排放对能源与环境具有一定影响. 一旦人口数量增加, 则能源需求将扩大, 能源消耗量也将增加; 同理, 人口数量增加将会加大污染物的排放总量, 从而对环境造成一定的影响.

3) 科技子系统, 主要研究在规定的经济水平、能源消耗量和生态环境条件下, 科技水平的提高对其他系统产生的影响. 在节能减排系统中考虑科技要素的目的在于技术是提高能源效率, 推进节能降耗、清洁生产的重要支撑. 系统分别以研发人员和 R&D 资本存量<sup>[33]</sup>为水平变量, 以研发人员增加和 R&D 新增支出为速率变量, 其余变量为辅助变量或常量. 科技产出受到研发人员和 R&D 资本存量的影响, 其涵盖专利授权数、科技论文、高技术产业产值等内容, 出于数据可获得性和操作性考虑, 本文把科技产出作为产出变量<sup>[34]</sup>, 以影响经济、能源和环境子系统.

4) 能源子系统, 主要研究在一定的经济发展水平和人口增长条件下能源的可承受力以及随着时间的推移, 能源消耗总量的变化对经济社会发展产生的影响. 系统主要考虑使用化石能源 (煤、石油、天然气) 和非化石能源所造成的能源消耗, 以能源累计消耗量为存量, 是为了更为直观地展现化石能源与非化石能源消耗量在能源子系统中流入与流出的动态关系. 能源消耗与经济总量存在因果关系, 经济水平的提高, 很大程度上会带动能源消耗量的增加, 而能耗成本既会对经济产生不利影响, 也会使得环境污染物不断增加, 反过来再次制约经济发展.

5) 环境子系统, 主要研究在一定的经济发展水平和人口增长条件下环境的可承载力以及随着时间的推移, 生态环境状况的变化对经济社会发展产生的影响. 为了探析污染物的动态循环发展关系, 文章把废水中 COD 和氨氮, 废气中 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 以及工业固体废物独立组成存量, 研究其产生量、治理量和排放量在不同时间和情境下的指标变动情况. 环境系统还设立环境相对污染度<sup>[35]</sup>以考察环境污染对经济总量产生的影响.

表 1 展现了节能减排系统中经济、人口、科技、能源和环境子系统的系统边界和主要变量.

表 1 节能减排系统边界和主要变量		
子系统	类型	主要变量
经济子系统	内生变量	国内生产总值、工业产值、工业产值占 GDP 比重、固定资产投资、环保投资、节能投资、污染损失、节能投资效果
	外生变量	GDP 增长率、固定资产增长率、固定资产折旧率、环保投入比重、节能投资比重、污染税调控因子、能源税调控因子、污染损失系数、节能投资效果系数、投资转换率
人口子系统	内生变量	人口总量、全社会劳动力、劳动力占比
	外生变量	人口死亡率、人口出生率、机械增长率、生育政策因子、生态环境影响因子、劳动力增长率
科技子系统	内生变量	研发人员、R&D 存量、科技产出、新增研发人员占重、R&D 投资所占比重
	外生变量	研发人员增长率、单位研发投资支出比重、知识折旧率、科技水平增长率、自然退休及转业率、人才引进政策因子
能源子系统	能源消耗	化石能源消耗量、非化石能源消耗量、化石能源消费弹性系数、非化石能源消费弹性系数、单位 GDP 能耗、能源污染系数
	外生变量	化石能源消耗增长率、非化石能源消耗增长率、技术进步对能耗影响因子、能源结构调整因子、绿色信贷影响因子、人口增加对能耗影响因子
环境子系统	污染物产生、治理与排放	生活污水量、生活污水 COD 浓度、生活污水氨氮浓度、COD 产生量、氨氮产生量、固废产生量、SO <sub>2</sub> 产生量、NO <sub>x</sub> 产生量、单位工业产值 COD 产生量、单位工业产值氮氧产生量、单位工业产值固废产生量、单位工业产值 SO <sub>2</sub> 产生量、单位工业产值 NO <sub>x</sub> 产生量、COD 治理量、COD 消耗量、氨氮治理量、固废再利用量、SO <sub>2</sub> 治理量、SO <sub>2</sub> 消耗量、NO <sub>x</sub> 治理量、NO <sub>x</sub> 消耗量、COD 排放量、氨氮排放量、固废排放量、SO <sub>2</sub> 排放量、NO <sub>x</sub> 排放量、环境相对污染度、COD 自然消散系数、SO <sub>2</sub> 自然消散系数
	外生变量	氨氮排污权交易政策因子、COD 排污权交易政策因子、减排专项资金影响因子、SO <sub>2</sub> 排污权交易政策因子、技术进步对污染影响因子、NO <sub>x</sub> 自然消散系数、NO <sub>x</sub> 排污权交易政策因子

6) 政府子系统. 政府子系统是节能减排系统的核心和运行枢纽, 政府所制定的政策会对区域节能减排起到引导和推进作用, 来自经济、人口、科技、能源和环境子系统系统中的任何因素都有可能直接或间接地受到政策因素的影响. 政策因素的作用是通过影响区域内企业的技术、管理和结构等诸多方面因素而体现出来的. 节能减排系统涉及的政策工具及其调控因子和选取依据如表 2 所示. 值得一提的是, 除了参考已有研究成果, 文章还根据中国情境的现实政策举措和政策需求设立待仿真的政策因子, 如将在“十三五”期间国家节能减排工作中重点推行的绿色信贷和排污权交易政策纳入系统仿真; 再者将西方发达国家在节能减排税收政策的先行经验作为政策参数在中国节能减排系统中进行动态模拟并验证其可行性. 通常来讲, 国家政策极具影响力, 节能减排政策调控对区域内企业和消费者具有较大的能动作用, 相关政策的运作将会直接影响节能减排指标值的发展趋势.

通过介绍节能减排系统中各子系统的边界和主要变量以及政策调控因素, 深入分析其相互因果关系, 了解各因素之间的正负反馈及制约影响情况, 并利用系统动力学软件 VENSIM PLE 6.0 绘制其因果关系图, 具体如图 2 所示.

表 2 节能减排系统政策因素及其选取依据

子系统	节能减排政策工具	政策调控因子	理论来源/现实依据
经济子系统	财政政策	环保投资比重	董会忠和王格采用环境治理投资因子考察经济系统对环境的影响 <sup>[36]</sup> ;
		节能投资比重	李桂君等考察财政支出对能源节约的关系; 每年政府财政支持能源的专项资金 <sup>[37]</sup> ;
		减排专项资金因子	国家资金补助和省级财政建立节能减排和循环经济发展专项资金;
	产业政策	工业产值占 GDP 比重	谭玲玲在产业系统中考虑了产业结构影响因子 <sup>[38]</sup> ;
能源子系统	税收政策	能源税调控因子	当前中国能源税的征收还未全面普及, 参考发达国家的经验, 设立能源税调控因子考察其现实意义;
	金融政策	绿色信贷影响因子	“十三五”节能减排综合工作方案强调进一步完善绿色信贷机制, 以绿色信贷遏制高耗能高污染行业;
环境子系统	税收政策	污染税调控因子	当前中国还没有独立的污染税种, 参考欧盟做法, 设立污染税调控因子考察其现实意义;
	环保政策	排污权交易政策因子	主要污染物排污权交易政策于 2016 年在全国工业排污企业全面推行, 通过系统仿真其政策效果;
科技子系统	科技政策	人才引进政策因子	宋学锋和刘耀彬在生态耦合系统中分析科技引进人才因子对科技水平的影响 <sup>[39]</sup> ;
		R&D 投资所占比重	王灵梅等在产业系统中设立了环保业的科技因子和投资比 <sup>[25]</sup> ;
人口子系统	人口政策	生育政策因子	王艳等在社会系统中考虑计划生育政策因子 <sup>[40]</sup> ; 十八届五中全会提出全面放开二胎政策;

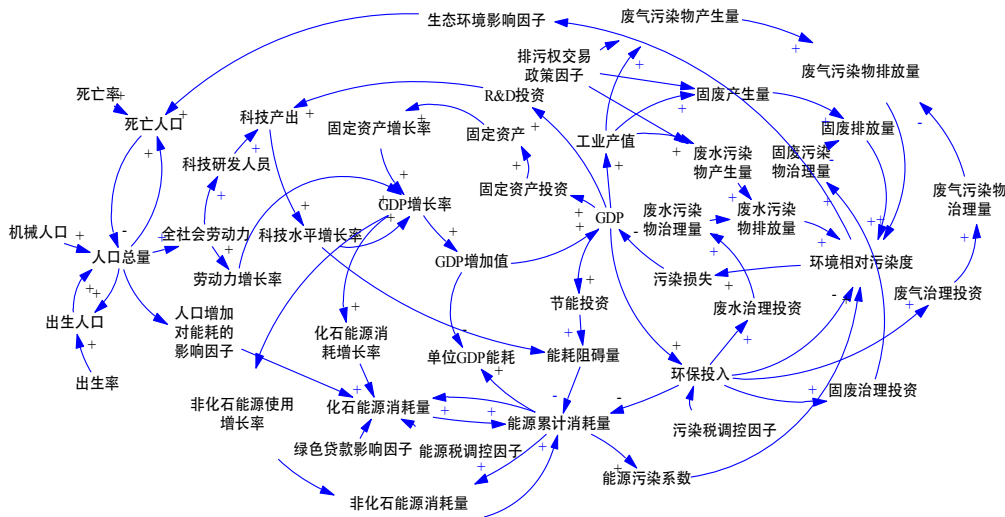


图 2 节能减排系统因果关系反馈图

3 节能减排系统构建及动态仿真

3.1 区域选择

本文选取福建省作为研究对象, 主要原因首先在于其是国内较早提出“生态省”战略构想的省份之一。2014 年 3 月, 国务院出台《关于支持福建省深入实施生态省战略加快生态文明先行示范区建设的若干意见》(国发〔2014〕12 号), 意味着其经济发展基础、生态条件受到国家认可, 研究该区域的节能减排系统符合当下的政策要求, 对其生态文明的先行示范有现实意义。其次, 福建省在系统考察期 2005–2014 年的年均 GDP 增长达到 12.4%, 除 2008 年受全球金融危机的微小波动外, 整体经济发展较为稳定, 符合我们模型的基本假设。最后, 福建省能源供需矛盾强烈, 作为常规性能源短缺地区, 能源消费高且节能形势严峻, 2014 年在国家节能减排报告中福建省被列为一级预警; 同时能源消费面临的环境容量瓶颈制约逐步显现, 尤其是 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放量在全国各省份中处于较高水平, 生态维护和环境保护压力持续加大, 在国家节能减排系统层面上单独研究福建省的节能减排情况, 具有现实需求。

当前福建省正处于工业化中期阶段,这一阶段是经济增长与生态平衡矛盾最为突出的时期。其产业结构表现为第一产业发展较为滞后,第二产业尤其是工业依然占据主导地位,第三产业发展尚为不足。2005–2014 年,福建省第二产业年均占 GDP 比重为 50.4%,其中工业占比超 43%;第二产业对经济增长的年均贡献为 61.3%,其中工业贡献 52.6%;第二产业年均拉动经济增长 7.6 个百分点,而工业平均拉动 6.6 个百分点,远超农业和服务业。可见,在工业依然主导的福建省,节能减排工作的展开仍然要在工业部门重点部署,这也印证我们的第一个假设,即节能减排系统主要考察工业企业。在工业结构中,传统上福建省以偏轻工业为主,但是在过去十余年,轻重工业的占比已没有很大差别,2005–2014 年,轻工业产值占比 46.3%,重工业产值占比 53.7%,轻重工业结构的均衡分布使得我们的模型不需要把工业产值这一变量再具体化,其工业特征在经济子系统中得以体现。同时,在能源消费结构方面,福建省仍然以煤炭为主体,石油、水电为两翼,天然气、风电、核电等新能源为补充。在 2005–2014 年,煤炭消费所占比重均高于 60%,石油、水电也均占约 30%。基于这一特征,我们设计了化石能源消费为主导的能源子系统。另外,环境、人口、科技子系统也在考察中国情境和福建现实情况的基础上予以变量设计。

### 3.2 模型构建

基于中国情境和福建省现实的工业特征,为进一步明确表示系统各要素之间的逻辑关系,以及系统的反馈形式和控制规律,文章在因果反馈回路图基础上,进一步区分变量的性质,通过引入水平变量 (level variable)、速率变量 (rate variable)、辅助变量 (auxiliary variable) 等要素,构造成更为深入的系统流图,使之全面地描绘出系统构成、行为和元素相互作用机制的全貌<sup>[41]</sup>。基于代表性、可获性和精简性等原则,选取 128 个变量建立节能减排系统动力学模型,其中 11 个水平变量,27 个速率变量,43 个辅助变量以及 47 个常量和表函数。结合以上各子系统的因果关系及反馈回路,将其按照拟定的模型框架进行整合,利用 VENSIM PLE 6.0 软件做出节能减排系统的总反馈结构图,如图 3 所示。

### 3.3 系统主要表达式推导和参数确定

文章使用系统动力学软件 VENSIM PLE 6.0 模型进行模拟仿真,模型运行范围为 2005–2025 年,仿真步长为 1 年。其中 2005–2014 年为模型运行与实际情况的检验年限,可进行模型调试和相关参数变量的确定;2015–2025 年为系统政策仿真的预测年限,这一阶段的模拟是为了预测未来十年的节能减排趋势,以便政策分析。模型主要数据来源于 2005–2015 年的《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国科技统计年鉴》、《福建省统计年鉴》、《福建省环境状况公报》等资料,数据准确、规范,资料来源可靠。模型对按当年价格计算的 GDP 时间序列数据换算成 2005 年不变价格修正的实际值,以消除价格因素变动的影响。

对于已有现成数据,通过算术平均值和加权平均值等方法求取较具代表性的参数值,个别时间序列数据采用指数平滑法进行处理。对于一些统计资料缺失的数据,为得到使参数能够在系统运行所需的较为真实的数据,通过数学计算法、公式推导法、回归分析法、拟合法、专家估计法、模糊综合评判法以及经验预测法等方法进行推导生成。文章在构建模型的过程中不断结合现实经验数据对变量进行调试,使模型能够更好地仿真出每一个变量之间的相互关系,力求基本符合福建省节能减排的现实情况。模型共设 134 个方程,由于篇幅有限,不能一一列出,故只列出各个子系统中较为重要的方程式,参见附录 A。

模型参数主要包括三种类型,分别是常数、初始值与表函数。根据节能减排系统结构特点,并考虑到主要变量数据变化的稳定性及变量间依存的特征,本文在借鉴相关文献的基础上,对个别参数进行界定。节能减排系统模型包含 26 个常量,其中多个常量可通过历史统计资料作算术平均或通过规范和专业文件直接获取,其参数及解释说明见附录 B。一些参数没有相关直接的数据来源,难以得到精确的数值,主要通过与相关行业专家讨论并估值,或通过搜集相关第一手材料,结合经验数据和在模型求解过程中对其进行调整来确定,其他变量取值及变量说明见附录 C。对于变化浮动较大的常量,文章利用表函数处理非线性问题的有效性,使模型能够更加准确地模拟现实系统。此类表函数包括化石能源消费弹性系数、非化石能源消费弹性系数、单位工业产值 COD 产生量、出生率、死亡率、劳动力占比、固定资产投资比例、人均生活污水排放量、研发人员增长率、技术进步对能耗影响因子、技术进步对污染治理影响因子等,其参数见附录 D。



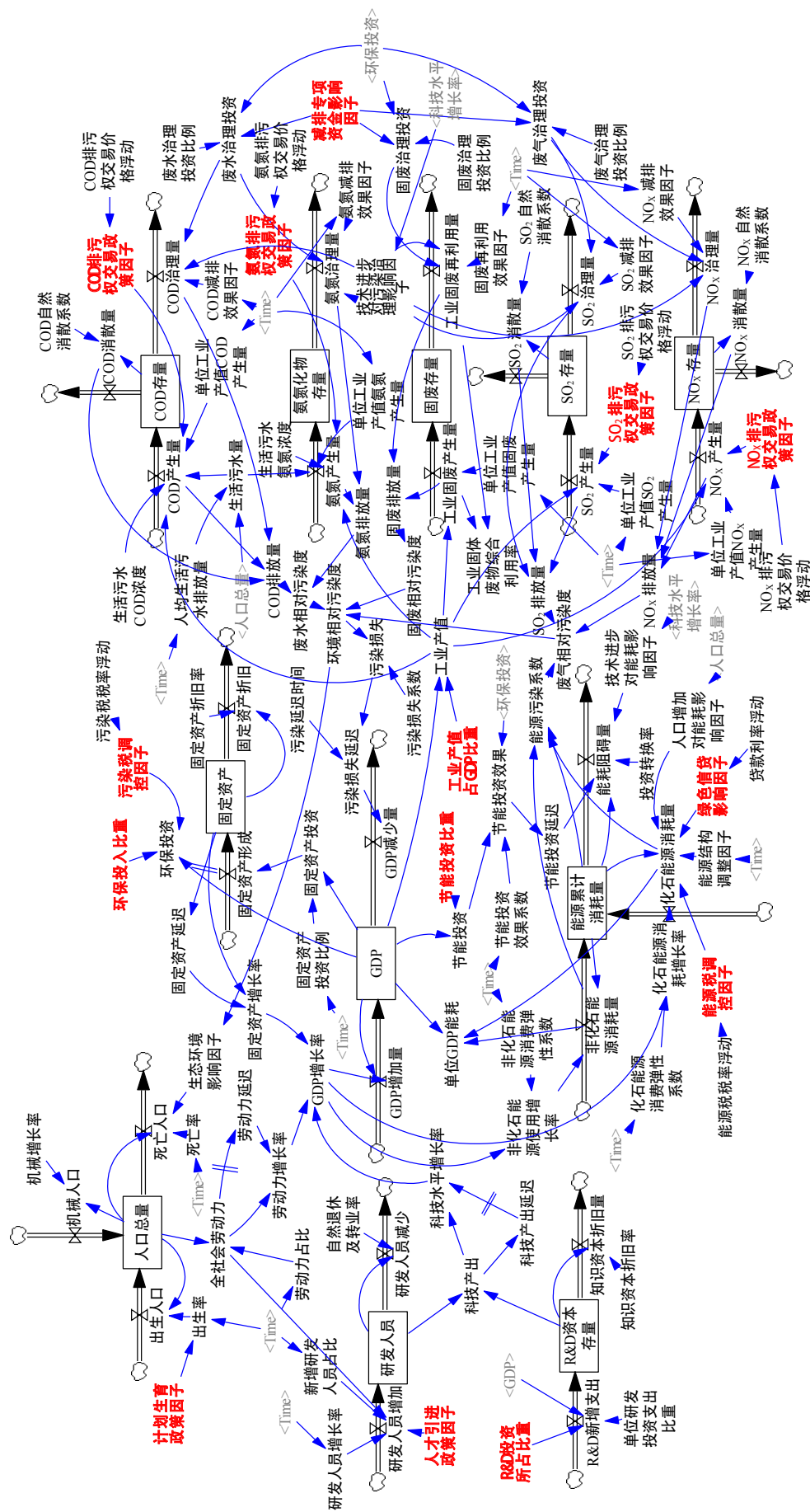


图 3 节能减排系统总反馈结构图



3.4 模型检验

系统动力学模型建立之后, 需要对模型的合理性和适用性进行检验, 关注检验结果是否能够较为准确地描述现状并解决研究问题. 模型先后进行了直观检验、稳定性检验、历史性检验和灵敏性检验. 由于篇幅有限, 文章着重介绍模型的历史性检验过程. 历史性检验是指通过对模型仿真行为对系统行为的过去拟合程度进行检验, 比较系统水平变量的仿真值与历史统计数据之间的差异来判断模型的有效性. 文章不仅对具有较为全面数据的三个水平变量, 包括人口总量、GDP、研发人员进行检验, 同时还对模型中能源消耗量、COD 排放量、氨氮化物排放量、固废排放量、SO<sub>2</sub> 排放量和 NO<sub>x</sub> 排放量进行检验. 考虑到历史数据的可获取性, 历史验证的起始时间为 2005 年, 终止时间为 2014 年, 检验时间为 10 年. 变量的历史拟合验证的精确度各有优劣, 这与模型本身和历史数据信息的充分正确程度都有密切关系. 表 3 反映了各个子系统中主要变量的历史性检验结果.

表 3 节能减排系统动力学模型历史检验结果

年份	人口总量 (万人)			GDP(亿元)			科技研发人员 (人)		
	历史值	仿真值	相对误差	历史值	仿真值	相对误差	历史值	仿真值	相对误差
2005	3557	3557.00	0.0000	6554.69	6554.69	0.0000	35815	35815	0.0000
2006	3585	3584.67	-0.0001	7524.78	7681.45	0.0208	40233	38621	-0.0401
2007	3612	3613.47	0.0004	8668.55	9078.00	0.0472	47642	45735	-0.0400
2008	3639	3644.15	0.0014	9795.46	10251.10	0.0465	59557	55912	-0.0612
2009	3666	3675.71	0.0026	11000.30	11304.00	0.0276	63269	67580	0.0681
2010	3693	3707.21	0.0038	12529.35	12401.40	-0.0102	76737	79984	0.0423
2011	3720	3738.61	0.0050	14070.46	13647.50	-0.0301	96884	95516	-0.0141
2012	3748	3768.70	0.0055	15680.93	15255.30	-0.0271	114492	114710	0.0019
2013	3774	3801.86	0.0074	17405.84	16870.80	-0.0307	122544	133549	0.0898
2014	3806	3832.08	0.0069	19129.01	18569.40	-0.0292	136925	147750	0.0791

年份	化石能源消耗量 (万吨)			非化石能源消耗量 (万吨)			COD 排放量 (万吨)		
	历史值	仿真值	相对误差	历史值	仿真值	相对误差	历史值	仿真值	相对误差
2005	4793.07	4792.67	0.0000	960.92	960.88	0.0000	39.44	39.37	-0.0018
2006	5271.00	5261.11	0.0000	1125.85	1123.78	-0.0018	39.55	39.41	-0.0035
2007	6099.75	6078.45	0.0000	1009.51	1006.11	-0.0034	38.32	38.12	-0.0053
2008	6419.39	6387.77	0.0000	1314.81	1308.25	-0.0050	37.82	37.57	-0.0066
2009	7217.57	7172.16	-0.0100	1136.10	1128.71	-0.0065	37.57	37.29	-0.0075
2010	7755.87	7696.48	-0.0100	1433.55	1422.79	-0.0075	37.26	36.95	-0.0084
2011	9042.09	8961.67	-0.0100	938.14	929.79	-0.0089	45.01	44.65	-0.0080
2012	8949.44	8858.57	-0.0100	1530.00	1514.03	-0.0104	44.19	43.77	-0.0093
2013	9645.70	9535.19	-0.0100	1544.21	1526.74	-0.0113	42.68	42.21	-0.0109
2014	10329.59	10198.40	-0.0100	1780.13	1757.12	-0.0129	41.25	40.72	-0.0128

年份	氨氮化物排放量 (万吨)			固废产生量 (万吨)			SO <sub>2</sub> 排放量 (万吨)		
	历史值	仿真值	相对误差	历史值	仿真值	相对误差	历史值	仿真值	相对误差
2005	5.11	5.11	-0.0003	3772.53	3772.53	0.0000	43.91	43.75	0.0037
2006	4.93	4.96	0.0060	4237.54	4231.17	-0.0015	44.61	44.32	0.0066
2007	2.99	3.03	0.0119	4814.86	4797.45	-0.0036	42.69	42.26	0.0101
2008	3.00	3.04	0.0137	5370.86	5355.71	-0.0028	40.93	40.38	0.0137
2009	3.01	2.96	-0.0169	6348.91	6328.66	-0.0032	39.92	39.27	0.0165
2010	2.98	2.97	-0.0021	7486.58	7401.64	-0.0113	39.12	38.38	0.0193
2011	6.10	6.03	-0.0116	7603.00	7470.53	-0.0174	37.03	36.21	0.0227
2012	5.95	6.00	0.0088	7720.00	7674.95	-0.0058	35.24	34.34	0.0262
2013	5.85	5.91	0.0098	8535.00	8473.19	-0.0072	34.20	33.21	0.0298
2014	5.58	5.52	-0.0115	9023.90	9091.88	0.0075	33.76	31.34	0.0773

由表 3 所反映的各个子系统中主要变量的历史值、仿真值和相对误差, 人口总量的历史值与仿真值之间最大相对误差为 0.0074, 拟合情况好, 其原因在于考虑了出生率和死亡率的变化过程以及福建省的机械增长

人口数量和计划生育控制政策(全面放开二胎政策)的影响因子,因此能较全面地反映出福建省人口总量的发展趋势;GDP 的历史值与仿真值之间最大相对误差为 0.0472,拟合情况良好,主要是因为从资本、劳动和技术三大要素考虑 GDP 增长率的构成方式,可信度较高;另外,能源消耗量和污染物排放量的仿真值与实际历史数据也呈现出相同的变化趋势.相对误差绝对值基本不超过 10%<sup>[42]</sup>,表明模型运行结果与实际数据之间拟合度高,模型能较为准确地描述研究系统的基本现状,具有良好的预测效果,可进行下一阶段的模拟仿真.

4 仿真结果分析

4.1 仿真结果输出

为了考察节能减排政策的成效以及政策实施力度的改变对能源消耗和污染物排放的影响作用,本文从税收、金融、财政、环保、产业和科技等六项政策维度出发,对节能减排政策进行模拟仿真.在使其他政策变量不变的情况下,对其中一项政策进行定量调整.每一政策维度分别设立两个方案,方案一表示目标政策的实施与现行初始政策的比较;方案二表示在同一目标政策下,不同实施强度对输出变量的影响程度.通过模拟仿真,可得到环境子系统和能源子系统的主要参数变量的系统仿真曲线图.其中,曲线 1 代表方案一,曲线 2 代表方案二,曲线 3 代表现行政策(即系统初始水平)<sup>1</sup>.

4.1.1 财政政策维度

设定环保投资比重、节能投资比重以及减排专项资金影响因子作为财政政策的调控因子.通过改变三个调控因子的参数值,并且由这三个因子的组合形成财政政策.此处假设政府实施单一财政政策,即增加对全省工业企业、公共部门和城市建设的环保投入、节能投资,并提高减排专项资金投入力度.设立两个政策方案,如表 4 所示,考察在财政政策条件下,输出变量的变化趋势,如图 4~5 所示.

	环保投入比重	节能投资比重	减排专项资金影响因子
现行政策下(初始)	0.011	0.005	1
财政政策下:方案一	0.02	0.008	1.1
财政政策下:方案二	0.022	0.01	1.2

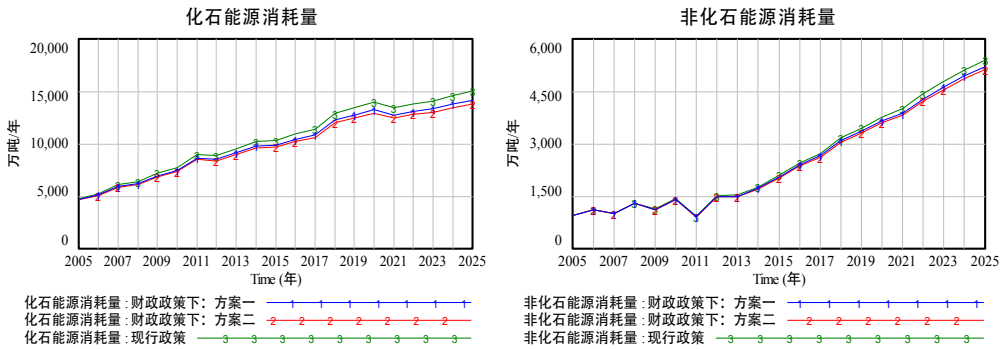


图 4 2005–2025 年福建省化石能源和非化石能源消耗量的仿真曲线

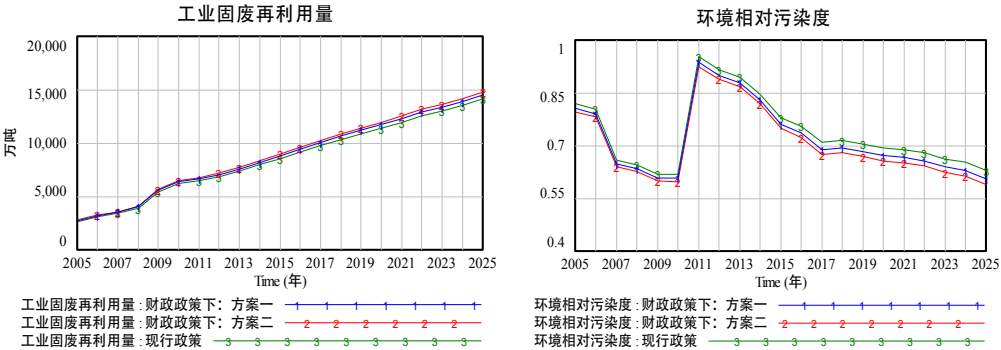


图 5 2005–2025 年福建省工业固体废物利用量与环境相对污染度的仿真曲线

1. 由于篇幅有限,文章在以下政策方案结果中仅列出少数仿真曲线图,有兴趣的读者可向作者索要所有的仿真图.

由图 4 可以看出, 增加环保和节能投入, 并提高减排专项资金补贴, 化石能源和非化石能源消耗量均有所减少. 对于化石能源消耗量, 对比初始条件和单一财政政策, 可发现随着时间的推移, 实施方案中财政政策的化石能源消耗比现行初始条件下的化石能源消耗量减少的量值逐渐拉大, 节能降耗的空间也逐渐拉大. 对于非化石能源消耗量, 实施单一财政政策下, 非化石能源消耗量曲线斜率更小, 即消耗量增长速度更慢, 节能降耗效果更好. 当提高财政政策力度, 即加大环保、节能投资和减排补贴比率, 化石能源和非化石能源的消耗量将更低, 消耗增长速度更慢, 节能效果更为明显.

通过图 5 可以发现, 随着环保投入和减排资金补贴的提高, 工业固体废物综合利用量将会增加, 直接排放的工业固废量将越来越少. 同时, 与初始状态相比, 从 2005–2025 年, 福建省工业固体废物综合利用率均比初始状态下的利用率更高, 这也体现出实施财政政策所具有的效果. 当实施强度政策更大的方案二, 工业固废综合利用量有所上升. 但是, 虽然加大环保投入和减排补贴对工业固废的资源化利用能产生效果, 实际上这一效果并不明显. 而对于环境相对污染度, 随着环保投入和节能投资的增加以及减排资金补贴的加大, 环境相对污染度相比现行政策有所改善. 当政策强度提升, 环境相对污染度缓慢下降. 这很大程度上与财政政策的激励性质相关, 一般而言, 规制性的政策对工业企业的约束能力更强, 而且政府的财政补贴是否能够在企业手上真正投入到绿色化生产尚且存疑.

4.1.2 税收政策维度

设定污染税税率浮动和能源税税率浮动作为税收政策的调控因子. 此处假设初始条件下两者浮动因子皆为 0, 污染税和能源税的影响因子为 1. 通过同时改变污染税税率浮动和能源税税率浮动的参数值, 并且由这两个因子的构成组合形成税收政策. 设立两个政策方案, 如表 5 所示, 考察在税收政策条件下, 输出变量的变化趋势, 如图 6~7 所示.

表 5 税收政策调控因子变化方案

	污染税税率浮动	能源税税率浮动
现行政策下 (初始)	0	0
财政政策下: 方案一	+3%	+3%
财政政策下: 方案二	+5%	+5%

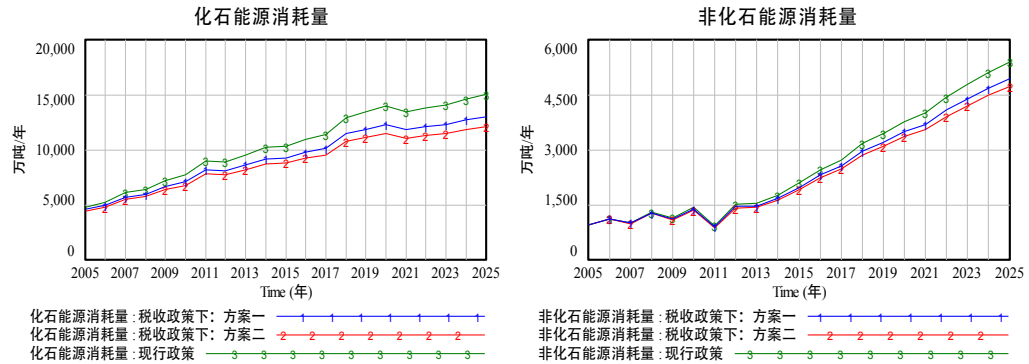


图 6 2005–2025 年福建省化石能源和非化石能源消耗量的仿真曲线

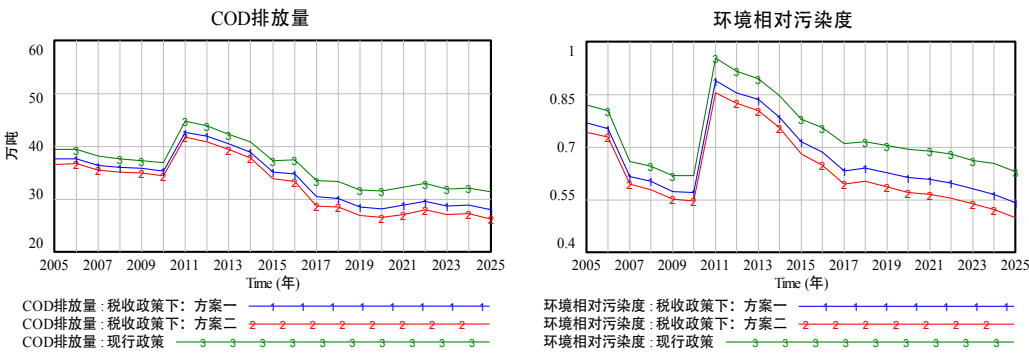


图 7 2005–2025 年福建省 COD 排放量和环境相对污染度的仿真曲线

由图 6 可以看出, 通过实施有效的税收政策, 化石能源和非化石能源消耗量均明显降低. 究其原因, 税率一旦提高, 企业生产成本加大, 经济压力将倒逼企业节能减排. 值得注意的是, 当改变污染税税率和能源税税率, 越到后期, 其节能降耗的空间更大. 同时, 改变税收政策力度产生的节能降耗成效不同. 以化石能源消耗量为例, 曲线 2 比曲线 1 降低的能耗量更大. 同时, 曲线 2 随着年限增加其斜率越来越小, 化石能源的消耗量变化幅度越来越小, 可见其节能效果要优于方案一.

图 7 可进一步窥探税收政策在减排层面的优势. 通过实施污染税和能源税征收方案, COD 和 SO<sub>2</sub> 的排放量均有较显著降低. 初始的现行政策下, COD 排放量至 2025 年依然在 30 万吨以上; 而当实施有效的税收政策后, 以方案一为例, COD 排放总量更少, 特别是在 2018 年后, COD 排放量几乎控制在 30 万吨以下. 另一方面, 由于税收政策的规制, 工业企业迫于压力不得不加大减排力度, 环境相对污染度呈现较大幅度地降低. 再者, 不同税收政策力度下, 对 COD 排放量和环境污染物的影响程度有不同表现. 对于 COD 排放量, 税收政策强度更大的方案二总体排放量比方案一少, 且在 2014 年后其相比方案一的下降幅度不断增大. 环境相对污染度也有同样的发展特征, 可见税收政策收效显著, 改善政策力度对环境污染的影响较为灵敏. 但是, 税率不是无限提高的, 税收政策的实施需要选择一个相对合理的税率以实现政府与企业、经济与生态效益的协调.

4.1.3 金融政策维度

设定绿色信贷利率浮动作为金融支持政策的调控因子. 绿色信贷利率与企业节能减排效果直接挂钩, 绿色信贷利率提高将倒逼企业通过加强减污降耗能力以争取在下一季度获得更低的贷款利率. 系统初始条件下, 假设绿色信贷利率浮动为 0, 绿色信贷影响因子为 1. 设立两个政策方案, 如表 6 所示, 考察在金融政策条件下, 输出变量的变化趋势, 如图 8~9 所示.

表 6 金融政策调控因子变化方案

绿色信贷利率浮动	
现行政策下 (初始)	0
财政政策下: 方案一	+3%
财政政策下: 方案二	-3%

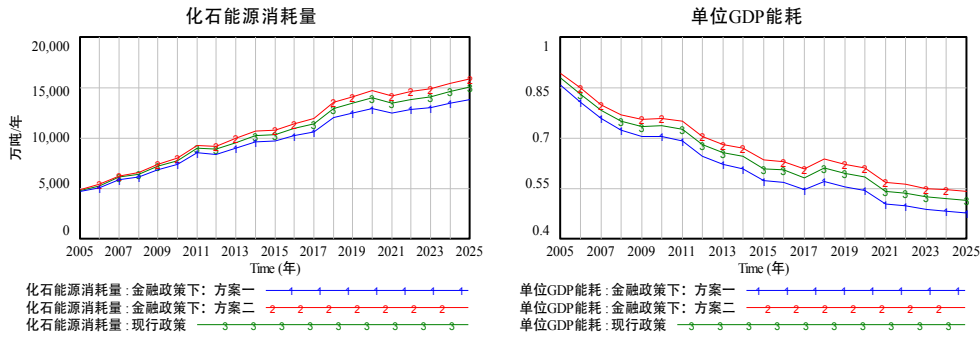


图 8 2005–2025 年福建省化石能源消耗量和单位 GDP 能耗的仿真曲线

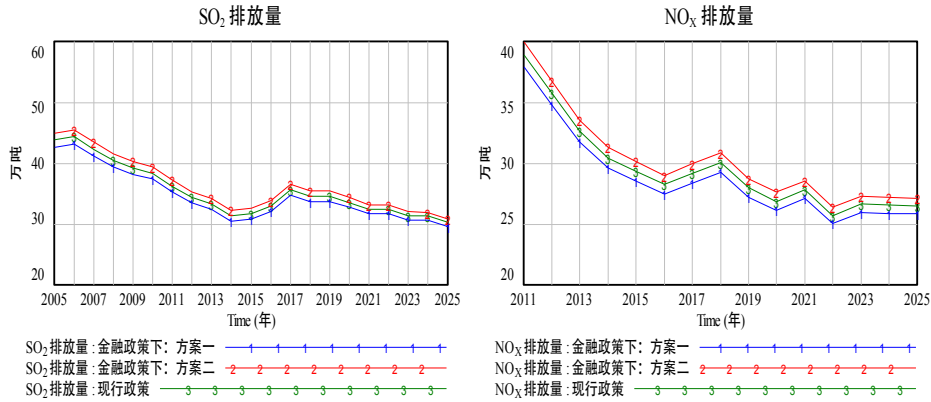


图 9 2005–2025 年福建省 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放量的仿真曲线

由图 8 可以发现, 金融政策的实施将对能耗产生正向影响. 依然考察化石能源消耗量, 曲线 2 斜率最大, 曲线 3 次之, 曲线 1 斜率最小. 即当提高绿色信贷利率, 企业会提高节能降耗力度, 故能源消耗速度将得到有效控制, 化石能源消耗量表现出缓慢增加的趋势; 当降低绿色信贷利率, 企业没有感受到节能减排的压力, 便会放任能源消费而导致能耗比初始水平更高. 在单位 GDP 能耗中, 金融政策的实施将得到更有说服力的解释. 政府通过绿色信贷利率规制和激励企业节能减排行为, 当信贷利率上浮, 单位 GDP 能耗基本低于利率下调和现行政策下两种情景下的能耗, 随着时间的推移, 提高信贷利率的节能效果更为明显.

SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放量与能源消耗关系最为密切. 在图 9 中, 当提高绿色信贷利率, 企业在主动降耗的同时也会促进减排, SO<sub>2</sub> 排放量将得到有效控制, 而降低绿色信贷利率, 将会导致企业放任污染物排放. 对于 NO<sub>x</sub> 排放量, 当提高绿色信贷利率, 企业为了获取更低利率会主动减排, 故方案一的 NO<sub>x</sub> 排放量会大大低于现行政策. 而当降低绿色信贷利率, 企业将不会自觉减排, NO<sub>x</sub> 排放量则会顺势提高. 金融政策既可以当为激励性措施, 也可以当成惩罚性手段, 绿色信贷利率的高低取决于企业对清洁生产活动的开展. 有关部门通过调控信贷利率, 以倒逼企业通过节能减排以获取更高的绿色信贷.

4.1.4 环保政策维度

在环保政策维度中主要考虑的是排污权交易政策. 在国家和福建省试点的主要污染物的排污权交易政策中, 设定 COD 排污权交易价格浮动、氨氮排污权交易价格浮动、SO<sub>2</sub> 排污权交易价格浮动、NO<sub>x</sub> 排污权交易价格浮动作为环保政策的调控因子. 假设初始条件下四种污染物排污权交易价格浮动因子皆为 0, 通过同时改变主要污染物排污权交易价格上浮的参数值, 并且由这四个因子的构成组合形成环保政策. 设立两个政策方案, 如表 7 所示, 考察在环保政策下, 输出变量的变化趋势, 如图 10~11 所示.

	COD 排污权 交易价格浮动	氨氮排污权交 易价格浮动	SO <sub>2</sub> 排污权交 易价格浮动	NO <sub>x</sub> 排污权 交易价格浮动
现行政策下 (初始)	0	0	0	0
财政政策下: 方案一	+10%	+10%	+10%	+10%
财政政策下: 方案二	+20%	+20%	+20%	+20%

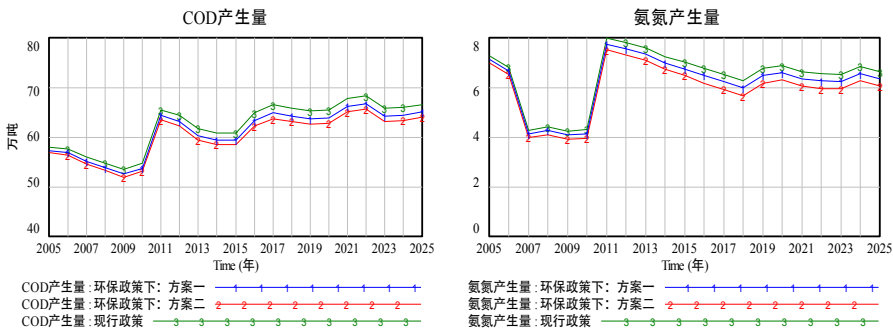


图 10 2005–2025 年福建省 COD 和氨氮产生量的仿真曲线

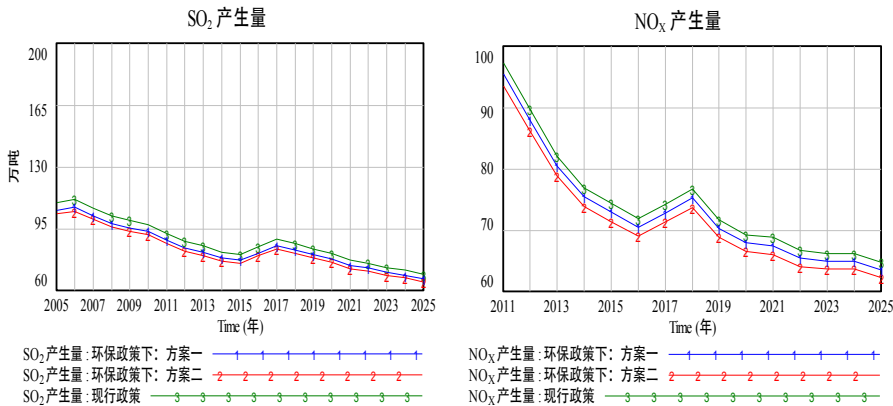


图 11 2005–2025 年福建省 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 产生量的仿真曲线

从图 10 和图 11 中, 明显发现在方案一中 COD、氨氮、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 产生量均低于初始水平, 而当政策力度提升到方案二时, 污染物产生量低于方案一的水平, 处于最低的位置. 排污权交易政策的显著减排效果主要得益于其面向污染前端的治理, 同时由于排污权交易往往受到市场机制作用, 其价格的波动十分迅速, 排污企业也会容易根据价格调整策略. 因此, 当提高排污权交易价格, 排污企业为获取更多排污权收益, 会主动减少污染物产生量, 腾出更多排污权空间, 一定程度上促进减排. 目前排污权交易政策尚处于起步阶段, 有关部门应根据实际的节能减排现状和市场形势, 合理选择一个较有成效的初始价格.

4.1.5 产业政策维度

设定工业产值占 GDP 比重作为产业政策的调控因子. 此处假设政府实施产业政策, 即通过降低工业在三大产业部门中的比重, 改变产业结构. 设立两个政策方案, 如表 8 所示, 考察在产业政策条件下, 输出变量的变化趋势, 如图 12~13 所示.

表 8 产业政策调控因子变化方案

工业产值占 GDP 比重	
现行政策下 (初始)	0.43
产业政策下: 方案一	0.4
产业政策下: 方案二	0.35

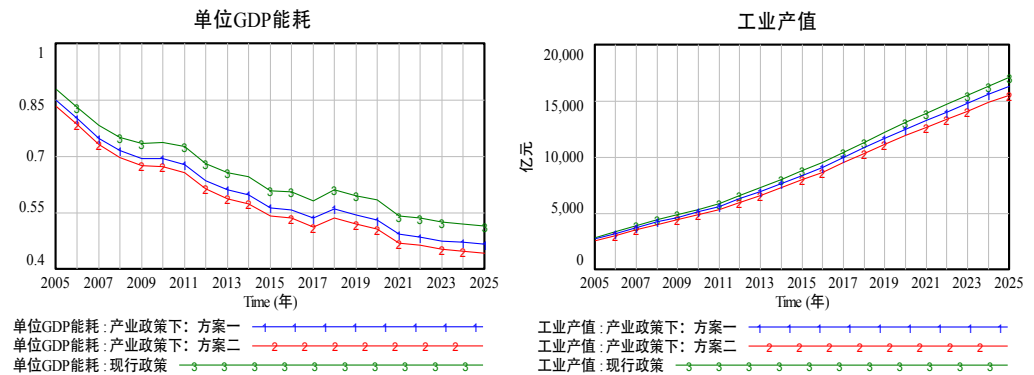


图 12 2005–2025 年福建省单位 GDP 能耗和工业产值的仿真曲线

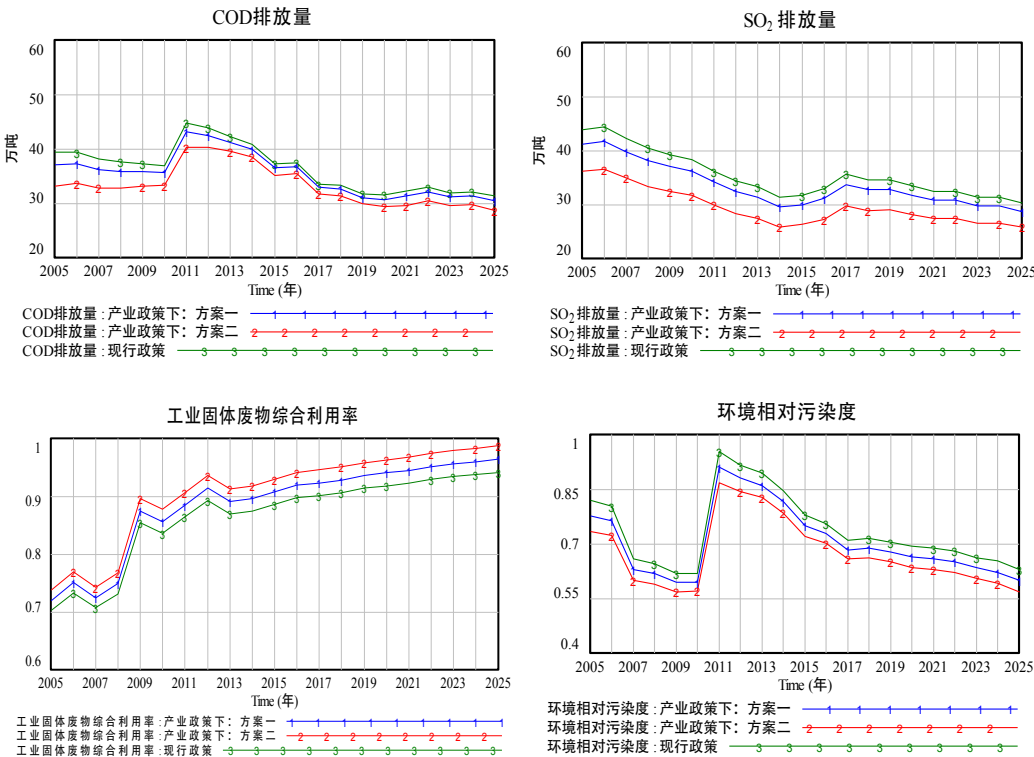


图 13 2005–2025 年福建省 COD 排放量、SO<sub>2</sub> 排放量、工业固废综合利用率 and 环境相对污染度的仿真曲线



通过图 12 可以看出,当降低工业产值占比时,工业结构的改变促使能源消耗明显降低,单位 GDP 能耗有两大突破,其一是早于现行政策条件四年时间降至 0.7 以下;其二是在 2021 年实现单位 GDP 能耗降至 0.5 以内,因此,产业结构转型对节能降耗效果较明显.同时,当增加产业政策强度,工业产值和单位 GDP 能耗下降的幅度更大.在单位 GDP 能耗中,曲线 2 斜率更低,其变化更为平缓.即当工业产值占 GDP 比重更低,则化石能源消耗量将有较为显著的下降,同时,能源消费速度将趋于平稳,节能降耗效果更为明显.

由图 13 可以发现,当改变产业结构时,污染物排放量和环境相对污染度也会降低,固废利用率将有一定幅度的提高.工业扩张往往带来环境污染物的产生.一旦工业所占比重下降, COD 和 SO<sub>2</sub> 的排放量均得到降低,而由于固废产生量减少,在技术水平不变的情况下,工业固废综合利用率将得到提高.对于环境相对污染度,实施产业政策后,环境将得到较好地改善.同时,当增加产业政策强度, SO<sub>2</sub> 排放量和工业固废产生量有明显减少的趋势,但是氨氮减排量较为稀少.这是因为工业固废和 SO<sub>2</sub> 排放总量绝大部分是由工业部门产生的,其对产业结构的变化更为敏感,而氨氮排放量有很大部分是由生活中产生的,工业比重的变化对其较不敏感.另外,对于环境相对污染度,当工业所占比重更低,对环境的影响将更小,故相对污染度更低,环境将得到较为有利的改善.

4.1.6 科技政策维度

设定人才引进政策因子和 R&D 投资所占比重作为科技政策的调控因子.通过改变两个调控因子的参数值,并且由这两个因子的构成组合形成科技政策.设立两个政策方案,如表 9 所示,考察在科技政策条件下,输出变量的变化趋势,如图 14~15 所示.

	人才引进政策因子	R&D 投资所占比重
现行政策下 (初始)	1	0.0013
财政政策下: 方案一	1.1	0.0018
财政政策下: 方案二	1.2	0.002

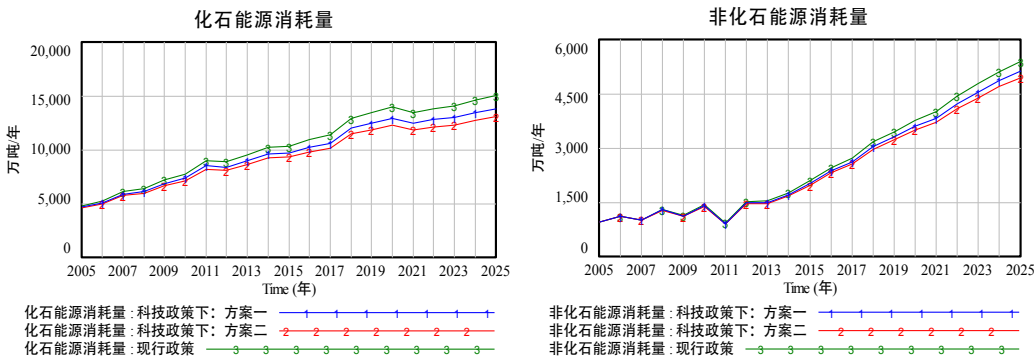


图 14 2005–2025 年福建省化石能源和非化石能源消耗量的仿真曲线

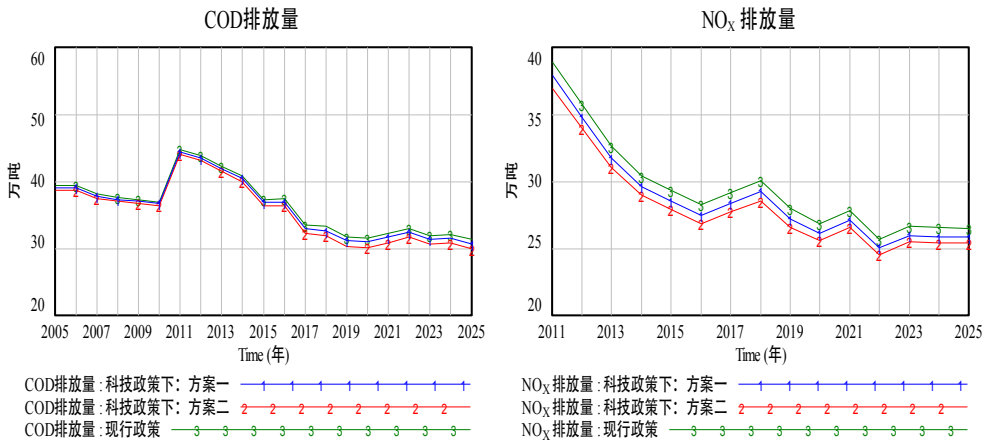


图 15 2005–2025 年福建省 COD 和 NO<sub>x</sub> 排放量的仿真曲线



通过图 14 很容易看出, 随着人才引进速度的加快, R&D 投资力度的加大, 福建省科技水平将得到较大的提升, 技术进步将有助于提高能源利用效率, 降低能源消耗, 然而科研成果的转化需要较长周期的延迟, 也就是说, 现行的科技政策不一定能在当年内发挥效果, 但是随着时间的延长, 技术水平的效果将会凸显出来. 随着时间推移, 化石能源消耗量和非化石能源消耗量与初始状态之间的空间越来越大, 在 2025 年后, 技术进步将进一步促进化石能源的节约. 另外, 当科技政策实施力度进一步加强, 化石能源消耗量将越低, 单位 GDP 能耗也将越小.

通过图 15 可以发现, 当实施有效的科技政策, 绿色技术将促进减排效率的提升, COD 和  $\text{NO}_x$  排放量将得到有效地降低, 但是由于技术的滞后性和风险性, 其减排效果不够明显. 另外, 在 COD 和  $\text{NO}_x$  排放量曲线中, 方案二所在的曲线 2 一直处于曲线 1 之下, 意味着当科技政策的实施力度更大, 对 COD 和  $\text{NO}_x$  等污染物的治理量将加大, 从而有效控制 COD 和  $\text{NO}_x$  等污染物的排放量.

## 4.2 仿真方案比较分析

我们以单位 GDP 能耗和环境相对污染度作为能源和环境子系统的输出指标, 进一步考察和比较不同政策的节能减排效果. 同样以上述六项节能减排政策工具及其调控因子作为政策输入变量, 参数值采用第 4.1 节方案一的数据, 为了同时与初始状态进行比较, 保留现行政策的节能减排状况. 图 16 和 17 分别是考察不同政策仿真下单位 GDP 能耗合环境相对污染度的变化趋势, 曲线 1~7 分别对应单一财政、税收、金融、环保、产业、科技以及现行初始政策.

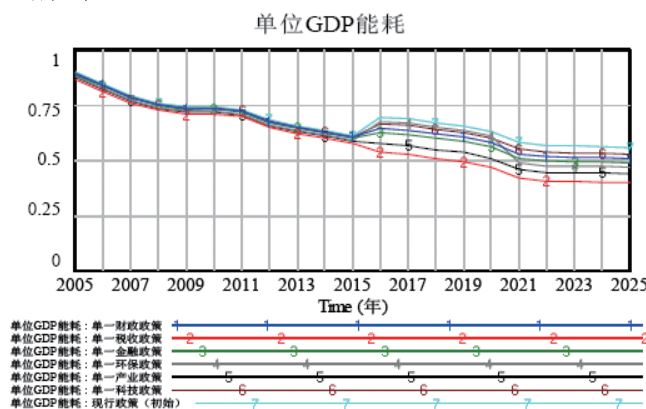


图 16 不同政策仿真下单位 GDP 能耗的仿真曲线

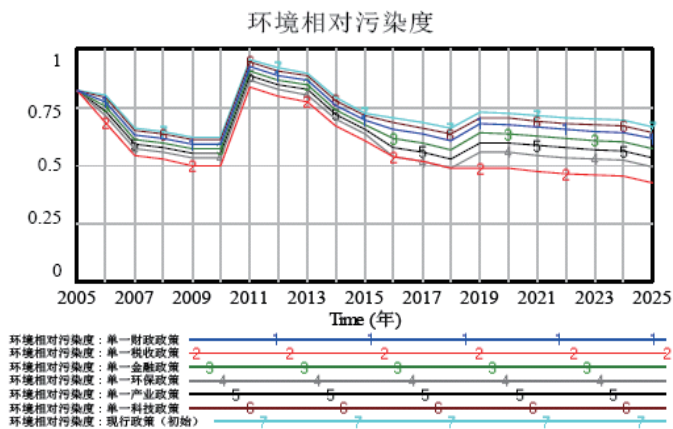


图 17 不同政策仿真下环境相对污染度的仿真曲线

由图 16 可以发现, 节能减排政策的效果主要体现在 2015 年之后. 从整体来看, 这六项政策的调控都一定程度上促进了能源节约, 使得单位 GDP 能耗低于初始水平. 从单一政策来看, 曲线 2 所处的位置最低, 往上依次是即曲线 5、4、3、1、6, 曲线 7 最高. 表明若单比较每项政策的节能减排效果, 在文章所设定的因子和参数值下, 税收政策的节能效果最为明显, 这主要是得益于能源税征收对工业企业的规制作用. 降低工业产值所占比重, 节能效果也非常明显, 位于第二位. 以主要污染物排污权交易制度为代表的环保政策能充分调

动企业的节能减排积极性, 由于该政策主要面向减排, 因此节能效果不是十分明显, 故在 2015–2021 期间段, 其节能效果甚至不如金融和财政政策, 但是随着排污权交易政策实施成熟起来, 其进一步会影响企业能耗的控制, 因为工业企业的污染物排放量主要来自能源的使用, 为了获取较大的排污权空间, 企业会从起根本上节能降耗以促进减排, 因此环保政策的节能趋势是可观的. 金融和财政政策主要定位于激励性措施, 从仿真图中也可以发现规制性举措对企业清洁生产的影响更为显著. 科技政策主要通过资金和人才研发绿色技术以促进节能降耗, 但由于其研发周期较长、技术转化时滞, 故其节能降耗在短期内不能立马体现出来, 但从长期来看, 科技促进节能减排是主要发展方向之一.

通过图 17 可知, 全局上其趋势特点与单位 GDP 能耗的发展路径较为一致. 六项政策的实施, 整体上优于现行政策. 其中, 曲线 2 (税收政策) 的减排效果最为显著, 在 2018 年之后环境相对污染度降到 0.5 以下. 依照减排能力, 接下来分别是曲线 4、5、3、1 和曲线 6. 在税收政策下, 主要是能源税和污染税的征收与基点调整使得该政策具有很强的约束能力. 同时, 曲线 2 较其他六条曲线在 2015 年之后波动较少, 曲线较为平坦. 曲线 4 位于第二低位, 对应的环保政策能直接影响其污染物的产生和减排效果, 但由于排污权的操作还需要较长过程, 故其较难与税收规制相比, 但其政策优势在与其他的政策相比上就占据了明显的优势. 曲线 5 (产业政策) 中, 随着工业结构调整, 节能效果体现得较为明显. 曲线 3、1、6 位于较高位置, 绿色信贷浮动利率的调整会直接影响其减排效果, 但是作为激励性举措, 其和财政政策相同, 约束能力较为一般, 但也不失为有效的减排效果. 技术进步对减排效率的改善具有促进作用, 而科技政策效果的发挥较慢, 它需要足够的知识积累和时间滞留.

## 5 结论

本文以节能减排系统为研究对象, 通过分析系统内部和外部各因素间的联系, 建立相应的系统动力学模型, 并通过设立不同政策情景, 考察节能减排政策的成效以及政策实施力度的改变对能源消耗和污染物排放的影响作用. 研究表明, 一方面, 政策的调整与实施往往能够影响能源消耗量和主要污染物排放, 有效的政策手段能够促进节能减排, 上述的六项政策工具都有得到验证; 而改变政策实施力度会直接作用于能源和环境子系统, 政策实施力度的确立应建立在区域节能减排目标的完成情况, 盲目加大政策实施强度往往会造成节能减排系统紊乱, 但是适度顺势调整政策强度, 往往能够产生可观的效果. 另一方面, 在考察不同政策的节能减排效果时, 可以发现税收政策、环保政策和产业政策对节能减排产生的效果最为明显, 其中环保政策下环境相对污染度虽降幅不及税收政策, 但主要污染物的前端治污效果凸显; 而金融政策、财政政策和科技政策也发挥出效果, 但其效果相对较弱, 其原因在于绿色信贷、财政补助覆盖面较窄, 同时技术进步对能源利用和排污治理效率的改善尚需要足够的知识积累和时间延迟. 因此, 本文提出了以下节能减排政策的优化策略:

在“创新开拓”推进节能减排的“十三五”期间, 可以考虑从税收、环保、产业、财政、金融和科技政策等六个方面出发, 适度开征污染税等相关绿色税收和调整能源税征收范围和能源产品税率; 严格执行排污收费制度和培育规范合理的排污权交易市场; 适度降低工业所占比重, 大力发展第三产业, 同时优化能源产业结构, 提高新能源所占比重; 落实绿色信贷问责制度, 并强化绿色信贷的激励和约束功能; 适度加大环保和节能投入, 增加绿色财政补贴; 建立研发投入稳定增长机制, 加强研发人才队伍建设, 以优化节能减排政策促进能耗和污染排放存量降低、增量控制, 继续全面推进节能减排.

## 参考文献

- [1] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发能源发展“十三五”规划的通知 [EB/OL]. [http://www.nea.gov.cn/2017-01/17/c\\_135989417.html](http://www.nea.gov.cn/2017-01/17/c_135989417.html).  
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The notice on printing the 13th five-year plan for energy development [EB/OL]. [http://www.nea.gov.cn/2017-01/17/c\\_135989417.html](http://www.nea.gov.cn/2017-01/17/c_135989417.html).
- [2] 张国兴, 张振华, 管欣, 等. 我国节能减排政策的措施与目标协同有效吗? ——基于 1052 条节能减排政策的研究 [J]. 管理科学学报, 2017(3): 161–181.  
Zhang G X, Zhang Z H, Guan X, et al. Is the synergy between measures and objectives of energy conservation and

- emission reduction policies in China effective? — Research on 1052 energy conservation and emission reduction policies[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2017(3): 161–181.
- [3] Edwards P J, Abivardi C. The value of biodiversity: Where ecology and economy blend[J]. *Biological Conservation*, 1998, 83(3): 239–246.
- [4] Brown L R. Eco-economy: Building an economy for the earth[J]. *Management of Environmental Quality*, 2001, 14(1): 159–159.
- [5] 王兵, 刘光天. 节能减排与中国绿色经济增长 —— 基于全要素生产率的视角 [J]. *中国工业经济*, 2015(5): 57–69.  
Wang B, Liu G T. Energy conservation and emission reduction and China's green economic growth — Based on a total factor productivity perspective[J]. *China Industrial Economics*, 2015(5): 57–69.
- [6] 段文斌, 刘大勇, 余泳泽. 异质性产业节能减排的技术路径与比较优势 —— 理论模型及实证检验 [J]. *中国工业经济*, 2013(4): 69–81.  
Duan W B, Liu D Y, Yu Y Z. Technology path choices and comparative advantages of heterogeneous industries for energy saving & emission reduction — Theoretical model and empirical evidence[J]. *China Industrial Economics*, 2013(4): 69–81.
- [7] 张丹, 王腊芳, 叶晗. 中国区域节能减排绩效及影响因素对比研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(S2): 69–73.  
Zhang D, Wang L F, Ye H. Comparative study of China's regional energy saving and emission reduction performance and influence factors[J]. *China Population, Resources & Environment*, 2012, 22(S2): 69–73.
- [8] 程时雄, 柳剑平, 龚兆璠. 中国工业行业节能减排经济增长效应的测度及影响因素分析 [J]. *世界经济*, 2016, 39(3): 166–192.  
Cheng S X, Liu J P, Gong Z Y. The measurement and influencing factors of the economic growth effect of energy saving and emission reduction in China's industrial[J]. *World Economy*, 2016, 39(3): 166–192.
- [9] 金桂荣, 张丽. 中小企业节能减排效率及影响因素研究 [J]. *中国软科学*, 2014(1): 126–133.  
Jin G R, Zhang L. Efficiency of energy saving and emission reduction in small and medium-sized enterprises and its influencing factors[J]. *China Soft Science*, 2014(1): 126–133.
- [10] 曹春辉, 席酉民, 曹瑄玮. 企业节能减排的动因探析与策略选择 [J]. *管理评论*, 2013, 25(7): 3–10.  
Cao C H, Xi Y M, Cao X W. Study on motivation and strategic choice of enterprises' energy saving and emission reduction[J]. *Management Review*, 2013, 25(7): 3–10.
- [11] Lo K, Wang M Y. Energy conservation in China's twelfth five-year plan period: Continuation or paradigm shift?[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18: 499–507.
- [12] Yuan J, Kang J, Yu C, et al. Energy conservation and emissions reduction in China — Progress and prospective[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(9): 4334–4347.
- [13] 张国兴, 高秀林, 汪应洛, 等. 中国节能减排政策的测量、协同与演变 —— 基于 1978–2013 年政策数据的研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(12): 62–73.  
Zhang G X, Gao X L, Wang Y L, et al. Measurement, coordination and evolution of energy conservation and emission reduction policies in China: Based on the research of the policy data from 1978 to 2013[J]. *China Population, Resources & Environment*, 2014, 24(12): 62–73.
- [14] Burt D, Dargusch P. The cost-effectiveness of household photovoltaic systems in reducing greenhouse gas emissions in Australia: Linking subsidies with emission reductions[J]. *Applied Energy*, 2015, 148: 439–448.
- [15] 张国兴, 张绪涛, 程素杰, 等. 节能减排补贴政策下的企业与政府信号博弈模型 [J]. *中国管理科学*, 2013, 21(4): 129–136.  
Zhang G X, Zhang X T, Cheng S J, et al. Signaling game model of government and enterprise based on the subsidy policy for energy saving and emission reduction[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2013, 21(4): 129–136.
- [16] 郭存芝, 孙康. 税收优惠的节能减排效应 —— 基于省级面板数据的实证分析 [J]. *资源科学*, 2013, 35(2): 261–267.  
Guo C Z, Sun K. The effects of preferential tax on energy saving and emission reduction according to panel data modeling of different provinces[J]. *Resources Science*, 2013, 35(2): 261–267.
- [17] 徐晓亮, 程倩, 车莹, 等. 煤炭资源税改革对行业发展和节能减排的影响 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(8): 77–83.  
Xu X L, Cheng Q, Che Y, et al. Impact on industry development and energy saving & emission reduction by coal resource tax reform[J]. *China Population, Resources & Environment*, 2015, 25(8): 77–83.
- [18] Callan T, Lyons S, Scott S, et al. The distributional implications of a carbon tax in Ireland[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(2): 407–412.
- [19] 肖挺, 刘华. 产业结构调整与节能减排问题的实证研究 [J]. *经济学家*, 2014(9): 58–68.  
Xiao T, Liu H. An empirical study on industrial structure adjustment and energy conservation and emission reduction[J]. *The Economist*, 2014(9): 58–68.
- [20] 于斌斌. 产业结构调整如何提高地区能源效率? —— 基于幅度与质量双维度的实证考察 [J]. *财经研究*, 2017, 43(1): 86–97.  
Yu B B. How does industrial restructuring improve regional energy efficiency? — An empirical study based on two dimensions of magnitude and quality[J]. *Journal of Finance & Economics*, 2017, 43(1): 86–97.

- [21] 王班班, 齐绍洲. 市场型和命令型政策工具的节能减排技术创新效应 —— 基于中国工业行业专利数据的实证 [J]. 中国工业经济, 2016(6): 91–108.  
Wang B B, Qi S Z. The effect of market-oriented and command-and-control policy tools on emissions reduction innovation — An empirical analysis based on China's industrial patents data[J]. China Industrial Economics, 2016(6): 91–108.
- [22] 修静, 刘海英, 臧晓强. 绿色信贷、节能减排下的工业增长及预测研究 [J]. 当代经济科学, 2015, 37(3): 55–62.  
Xiu J, Liu H Y, Zang X Q. The industrial growth and prediction under the background of green credit and energy saving and emission reduction[J]. Modern Economic Science, 2015, 37(3): 55–62.
- [23] 邓平, 戴胜利, 邓明然, 等. 促进节能减排的金融支持体系研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(4): 59–75.  
Ding P, Dai S L, Deng M R, et al. On financial supporting system for promoting energy saving and pollutant reduction in China[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(4): 59–75.
- [24] 程叶青, 李同升, 张平宇. SD 模型在区域可持续发展规划中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(12): 13–18.  
Cheng Y Q, Li T S, Zhang P Y. Application of system dynamic model in regional sustainable development planning[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2004, 24(12): 13–18.
- [25] 王灵梅, 张金屯, 倪维斗. 火电厂生态工业园的系统动力学模拟与调控 [J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(7): 117–124.  
Wang L M, Zhang J T, Ni W D. Simulation and adjustment of system dynamics on power plant eco-industrial park[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2005, 25(7): 117–124.
- [26] 杨浩雄, 李金丹, 张浩, 等. 基于系统动力学的城市交通拥堵治理问题研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(8): 2135–2143.  
Yang H X, Li J D, Zhang H, et al. Research on the governance of urban traffic jam based on system dynamics[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2014, 34(8): 2135–2143.
- [27] 徐升华, 吴丹. 基于系统动力学的鄱阳湖生态产业集群“产业 - 经济 - 资源”系统模拟分析 [J]. 资源科学, 2016, 38(5): 871–887.  
Xu S H, Wu D. Analysis on the “industry-economy-resources” simulated system of Poyang lake eco-industrial clusters based on systematic dynamics[J]. Resources Science, 2016, 38(5): 871–887.
- [28] 唐丽敏, 曾颖, 王成武, 等. 基于系统动力学的物流节能减排政策模拟 [J]. 系统工程, 2013, 31(6): 87–94.  
Tang L M, Zeng Y, Wang C W, et al. The logistics policy simulation of energy saving and emission reduction based on system dynamics[J]. Systems Engineering, 2013, 31(6): 87–94.
- [29] 黄飞, 李兰兰, 於世为, 等. 基于 SD 的煤炭矿区节能减排仿真与调控 [J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(6): 74–83.  
Huang F, Li L L, Yu S W, et al. Simulation and adjustment of energy saving and emission reduction in coal mining area based on system dynamics[J]. Mathematics in Practice & Theory, 2012, 42(6): 74–83.
- [30] Qu W, Barney G, Symalla D, et al. Threshold 21: National sustainable development model[J]. Integrated Global Models of Sustainable Development, 1995, 2: 78–87.
- [31] 黄振中, 王艳, 李思一, 等. 中国可持续发展系统动力学仿真模型 [J]. 计算机仿真, 1997(4): 3–7.  
Huang Z Z, Wang Y, Li S Y, et al. A system dynamics simulation model for the sustainable development of China[J]. Computer Simulation, 1997(4): 3–7.
- [32] 潘婧, 杨山, 沈芳艳. 基于系统动力学的港城耦合系统模型构建及仿真 —— 以连云港为例 [J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(11): 2439–2446.  
Pan J, Yang S, Shen F Y. Construction and simulation of port city coupled system model based on systems dynamics: Taking Lianyungang as a case[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2012, 32(11): 2439–2446.
- [33] Griliches Z. R&D and the productivity slowdown[J]. American Economic Review, 1980, 70(1): 343–348.
- [34] 吴延兵. R&D 存量、知识函数与生产效率 [J]. 经济学 (季刊), 2006, 5(4): 1129–1156.  
Wu Y B. R&D stock, knowledge function and productive efficiency[J]. China Economic Quarterly, 2006, 5(4): 1129–1156.
- [35] 丁凡, 王艳, 李思一, 等. 中国可持续发展系统动力学仿真模型 —— 环境部分 [J]. 计算机仿真, 1998, 15(1): 8–10.  
Ding F, Wang Y, Li S Y, et al. A system dynamics simulation model for the sustainable development of China — Environmental Sector[J]. Computer Simulation, 1998, 15(1): 8–10.
- [36] 董会忠, 王格. 山东半岛蓝色经济区经济 - 环境复合系统仿真与发展对策研究 [J]. 软科学, 2017, 31(2): 103–108.  
Dong H Z, Wang G. Study on simulation and development countermeasures of economy-environment composite system in Shandong peninsula blue economic zone[J]. Soft Science, 2017, 31(2): 103–108.
- [37] 李桂君, 黄道涵, 李玉龙. 水 - 能源 - 粮食关联关系: 区域可持续发展研究的新视角 [J]. 中央财经大学学报, 2016(12): 76–90.  
Li G J, Huang D H, Li Y L. Water-energy-food nexus (WEF-Nexus): New perspective on regional sustainable development[J]. Journal of Central University of Finance & Economics, 2016(12): 76–90.
- [38] 谭玲玲. 我国低碳经济发展机制的系统动力学建模 [J]. 数学的实践与认识, 2011, 41(12): 106–113.  
Tan L L. System dynamics modeling on the development mechanism of the low-carbon economy in China[J]. Mathematics in Practice & Theory, 2011, 41(12): 106–113.

[39] 宋学锋, 刘耀彬. 基于 SD 的江苏省城市化与生态环境耦合发展情景分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(3): 124–130.  
Song X F, Liu Y B. Scenarios simulation of urbanization and ecological environment coupling in Jiangsu province by system dynamic model[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2006, 26(3): 124–130.

[40] 王艳, 李思一, 吴叶君, 等. 中国可持续发展系统动力学仿真模型 —— 社会部分 [J]. 计算机仿真, 1998(1): 5–7.  
Wang Y, Li S Y, Wu Y J, et al. A system dynamics simulation model for the sustainable development of China — Social sector[J]. Computer Simulation, 1998(1): 5–7.

[41] 翁异静, 邓群钊, 杜磊, 等. 基于系统仿真的提升赣江流域水生态承载力的方案设计 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(10): 3353–3366.  
Weng Y J, Deng Q Z, Du L, et al. Project design to improve water ecology carrying capacity of Ganjiang River Basin based on system simulation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(10): 3353–3366.

[42] 刘志强, 陈渊, 金剑, 等. 基于系统动力学的农业资源保障及其政策模拟: 以黑龙江省为例 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(9): 1586–1592.  
Liu Z Q, Chen Y, Jin J, et al. Agricultural resources guarantee and its policy simulation based on systematic dynamics: Taken Heilongjiang province as example[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2010, 30(9): 1586–1592.

附录 A 节能减排系统动力学模型的主要方程

参数	方程式
人口总量	INTEG(出生人口 – 死亡人口 + 机械人口, 3557)
出生人口	人口总量 * 出生率
死亡人口	人口总量 * 死亡率 * 生态环境影响因子
机械人口	人口总量 * 机械增长率
全社会劳动力	人口总量 * 劳动力占比
劳动力增长率	(全社会劳动力 – 劳动力延迟)/劳动力延迟
劳动力延迟	SMOOTH(全社会劳动力, 11814.03)
研发人员	INTEG(研发人员增加 – 研发人员减少, 35815)
研发人员增加	研发人员增长率 * 人才引进政策因子 * 新增研发人员占比 * 全社会劳动力 * 10000
研发人员减少	研发人员 * 自然退休及转业率
R&D 资本存量	INTEG(R&D 新增支出 – 知识资本折旧量, 9.02)
R&D 新增支出	GDP * R&D 投资所占比重 * 单位研发投资支出比重
知识资本折旧量	R&D 资本存量 * 知识资本折旧率
科技产出	(“R&D 资本存量”^0.4416) * (研发人员 ^0.5584) * 0.5
科技产出延迟	SMOOTH(科技产出, 1, 230)
GDP 增长率	劳动力增长率 * 0.6927+ 固定资产增长率 * 0.3327+ 科技水平增长率
GDP	INTEG(GDP 增加量 – GDP 减少量, 6554.69)
GDP 增加量	GDP * GDP 增长率
GDP 减少量	污染损失延迟
固定资产投资	GDP* 固定资产投资比例
固定资产	INTEG(固定资产形成 – 固定资产折旧, 4899.03)
固定资产形成	DELAY3(固定资产投资, 3) * 0.95
固定资产折旧	固定资产 * 固定资产折旧率
固定资产延迟	SMOOTH(固定资产, 1, 3919.22)
固定资产增长率	(固定资产 – 固定资产延迟)/固定资产延迟
环保投资	GDP* 环保投入比重 * 污染税调控因子
节能投资	GDP* 节能投资比重
节能投资效果	(环保投资 * 0.3+ 节能投资) * 节能投资效果系数
节能投资延迟	DELAY3(节能投资效果, 3)
能源累计消耗量	INTEG(化石能源消耗量 + 非化石能源消耗量 – 能耗阻碍量, 27033)

续附录 A

参数	方程式
非化石能源消耗量	非化石能源使用增长率 * 能源累计消耗量
化石能源消耗量	化石能源消耗增长率 * 能源累计消耗量 * 绿色信贷影响因子 * 人口增加对能耗影响因子 * 能源税调控因子 * 能源结构调整因子
能耗阻碍量	(节能投资延迟 * 投资转换率 + 能源累计消耗量 * 技术进步对能耗影响因子)/10
化石能源消耗增长率	GDP 增长率 * 化石能源消费弹性系数
能源污染系数	(非化石能源消耗量 * 0+ 化石能源消耗量 * 0.726+ 化石能源消耗量 * 0.248 * 0.79+ 化石能源消耗量 * 0.025 * 0.55)/能源累计消耗量
非化石能源使用增长率	GDP 增长率 * 非化石能源消费弹性系数
工业产值	GDP * 工业产值占 GDP 比重
COD 存量	INTEG(COD 产生量 - COD 治理量 - COD 消散量, 70)
COD 产生量	工业产值 * 单位工业产值 COD 产生量 + 生活污水量 * 生活污水 COD 浓度 * COD 排污权交易政策因子
生活污水量	人口总量 * 人均生活污水排放量 * 10000
COD 治理量	COD 减排效果因子 * 废水治理投资 * 技术进步对污染治理影响因子
废水治理投资	环保投资 * 废水治理投资比例 * 减排专项资金影响因子
COD 消散量	COD 存量 * COD 自然消散系数
COD 排放量	COD 产生量 - COD 治理量 - COD 消散量
氨氮化物存量	INTEG(氨氮产生量 - 氨氮治理量, 50)
氨氮产生量	工业产值 * 单位工业产值氨氮产生量 + 生活污水量 * 生活污水氨氮浓度 * 氨氮排污权交易政策因子
氨氮治理量	氨氮减排效果因子 * 废水治理投资 * 技术进步对污染治理影响因子
氨氮排放量	氨氮产生量 - 氨氮治理量
固废存量	INTEG(工业固废产生量 - 工业固废再利用量, 6420)
工业固废产生量	工业产值 * 单位工业产值固废产生量
工业固废再利用量	固废治理投资 * 固废再利用效果因子 * 技术进步对污染治理影响因子
固废治理投资	环保投资 * 固废治理投资比例 * 减排专项资金影响因子
工业固废综合利用率	工业固废再利用量/工业固废产生量
SO <sub>2</sub> 存量	INTEG(SO <sub>2</sub> 产生量 - SO <sub>2</sub> 治理量 - SO <sub>2</sub> 消散量, 80)
SO <sub>2</sub> 产生量	工业产值 * 单位工业产值 SO <sub>2</sub> 产生量 * SO <sub>2</sub> 排污权交易政策因子
SO <sub>2</sub> 治理量	废气治理投资 * SO <sub>2</sub> 减排效果因子 * 技术进步对污染治理影响因子
废气治理投资	环保投资 * 废气治理投资比例 * 减排专项资金影响因子
SO <sub>2</sub> 消散量	SO <sub>2</sub> 存量 * SO <sub>2</sub> 自然消散系数
SO <sub>2</sub> 排放量	SO <sub>2</sub> 产生量 - SO <sub>2</sub> 治理量 - SO <sub>2</sub> 消散量
NO <sub>x</sub> 存量	INTEG(NO <sub>x</sub> 产生量 - NO <sub>x</sub> 治理量 - NO <sub>x</sub> 消散量, 0)
NO <sub>x</sub> 产生量	工业产值 * 单位工业产值 NO <sub>x</sub> 产生量 * NO <sub>x</sub> 排污权交易政策因子
NO <sub>x</sub> 治理量	废气治理投资 * NO <sub>x</sub> 减排效果因子 * 技术进步对污染治理影响因子
NO <sub>x</sub> 消散量	NO <sub>x</sub> 存量 * NO <sub>x</sub> 自然消散系数
NO <sub>x</sub> 排放量	NO <sub>x</sub> 产生量 - NO <sub>x</sub> 治理量 - NO <sub>x</sub> 消散量
废水相对污染度	COD 排放量/39.44+ 氨氮排放量/5.115
固废相对污染度	固废排放量/3772.53
废气相对污染度	(SO <sub>2</sub> 排放量/43.91+ NO <sub>x</sub> 排放量/39.13)* 能源污染系数
环境相对污染度	(0.1 * 固废相对污染度 + 0.35 * 废水相对污染度 + 0.55 * 废气相对污染度)
污染损失	环境相对污染度 * 污染损失系数
污染损失延迟	SMOOTH(污染损失, 污染延迟时间)
单位 GDP 能耗	(化石能源消耗量 + 非化石能源消耗量)/GDP

附录 B 已知参数及解释说明

参数	数值	来源
机械增长率	0.00236	由年度人口迁入与迁出率相减计算得出
环保投入比重	0.011	由福建省统计局历年环境污染治理投资总额计算得出
工业产值占 GDP 比重	0.43	由福建省统计年鉴工业产值和地区生产总值推算得出
生活污水 COD 浓度	0.0003	参考《建筑中水设计规范》(GB 50336-2002), 对各种生活用水类别 COD 排放量求算术平均值, 换算为吨/吨表示
生活污水氨氮浓度	0.000033	参考《建筑中水设计规范》(GB 50336-2002), 对各种生活用水类别氨氮排放量求算术平均值, 换算为吨/吨表示
废水治理投资比例	0.4	由福建省统计年鉴中环境污染治理投资数据计算得出
固废治理投资比例	0.2	由福建省统计年鉴中环境污染治理投资数据计算得出
废气治理投资比例	0.4	由福建省统计年鉴中环境污染治理投资数据计算得出
污染损失系数	15.28	参考环境保护部环境规划院所采用的治理成本法得出

附录 C 其他参数及解释说明

参数	公式/数值	参数解释
计划生育政策因子	IF THEN ELSE (Time>2017, 1.004, 1)	通过推算全面二胎政策放开后福建省人口预计增长数量获得
生态环境影响因子	IF THEN ELSE(环境相 对污染度 >=0.8, 1.1, 1)	环境污染的对人口总量所造成的影响, 采用专家经验法确定
自然退休及转业率	0.01	每年自然退休和转业的研发人数占比, 结合中国科技年鉴和经验法确定
单位研发投资支出比	0.9	单位研发投入转化为支出的比例, 根据经验法计算获得
节能投资比重	0.005	由福建省统计局历年 GDP 和节能投资总额拟合得出, 由拟合法确定
R&D 投入比重	0.0013	由福建省统计局历年 GDP 和研发投资总额拟合得出, 由拟合法确定
能源结构调整因子	IF THEN ELSE (Time>2020, 0.95, 1)	能源结构变化对化石能源消耗量的影响, 由专家经验法确定
人口增加对能耗影响因子	IF THEN ELSE(人口总 量 >3950, 1.08, 1)	人口总量增加对化石能源消耗量的影响, 由专家经验法确定
投资转换率	1	节能投资转化为能源节约量的比率, 由模糊综合评判法确定
知识资本折旧率	0.096	每年知识资本折旧的比例, 由专家经验法确定
固定资产折旧率	0.1	由福建省各类资产在固定资产中所占比重及损耗得出
节能投资效果系数	0.5495 + 0.1365* SIN(3.14 * (Time - 2005))	节能投资效果的控制因子, 由专家经验法确定



## 附录 D 主要参数表函数方程

参数	表函数方程
出生率	WITH LOOKUP (Time* 计划生育政策因子, ([ (2005, 0)–(2025, 0.2)], (2005, 0.0116), (2006, 0.012), (2007, 0.01203), (2008, 0.0122), (2009, 0.01221), (2010, 0.01127), (2011, 0.01141), (2012, 0.01274), (2013, 0.0122), (2014, 0.0127), (2015, 0.0117), (2016, 0.01224), (2017, 0.0123), (2018, 0.01137), (2019, 0.01159), (2020, 0.0113), (2021, 0.0116), (2022, 0.01159), (2023, 0.01139), (2024, 0.01157), (2025, 0.01162)))
死亡率	WITH LOOKUP (Time, ([ (2005, 0)–(2025, 0.008)], (2005, 0.00562), (2006, 0.00575), (2007, 0.0059), (2008, 0.0059), (2009, 0.006), (2010, 0.00516), (2011, 0.0052), (2012, 0.00573), (2013, 0.00601), (2014, 0.00603), (2015, 0.00598), (2016, 0.00613), (2017, 0.00615), (2018, 0.00593), (2019, 0.00581), (2020, 0.00579), (2021, 0.00563), (2022, 0.00554), (2023, 0.00562), (2024, 0.00553), (2025, 0.00551)))
研发人员增长率	WITH LOOKUP (Time, ([ (2005, 0)–(2025, 1)], (2005, 0.213079), (2006, 0.217777), (2007, 0.186298), (2008, 0.223144), (2009, 0.205741), (2010, 0.206652), (2011, 0.21337), (2012, 0.222863), (2013, 0.2062), (2014, 0.1564), (2015, 0.1364), (2016, 0.1255), (2017, 0.1255), (2018, 0.1132), (2019, 0.1112), (2020, 0.1044), (2021, 0.0954), (2022, 0.0869), (2023, 0.0768), (2024, 0.0632), (2025, 0.0601)))
技术进步对能耗影响因子	WITH LOOKUP (科技水平增长率, ([ (0, 0)–(1, 0.06)], (0.003, 0.01), (0.01, 0.012), (0.02, 0.014), (0.03, 0.016), (0.04, 0.018), (0.05, 0.02), (0.06, 0.021), (0.07, 0.0215)))
技术进步对污染治理影响因子	WITH LOOKUP (科技水平增长率, ([ (0, 0)–(1, 2)], (0.004, 1.01), (0.01, 1.11), (0.02, 1.12), (0.03, 1.13), (0.04, 1.14), (0.05, 1.15), (0.06, 1.16), (0.07, 1.17)))
化石能源消费弹性系数	WITH LOOKUP (Time, ([ (2005, 0)–(2025, 2)], (2005, 1.02), (2006, 0.8764), (2007, 1.192), (2008, 1.3359), (2009, 1.363), (2010, 1.2274), (2011, 1.066), (2012, 1.0286), (2013, 1.033), (2014, 1.0041), (2015, 1.0755), (2016, 0.8986), (2017, 0.9449), (2018, 0.9807), (2019, 1.0504), (2020, 1.1416), (2021, 1.0858), (2022, 1.0929), (2023, 1.1046), (2024, 1.1716), (2025, 1.2478)))
非化石能源消费弹性系数	WITH LOOKUP (Time, ([ (2005, 0)–(2025, 1)], (2005, 0.2045), (2006, 0.1872), (2007, 0.1973), (2008, 0.2736), (2009, 0.2145), (2010, 0.2269), (2011, 0.1106), (2012, 0.1758), (2013, 0.1654), (2014, 0.173), (2015, 0.2176), (2016, 0.2017), (2017, 0.2268), (2018, 0.2605), (2019, 0.2923), (2020, 0.3324), (2021, 0.3318), (2022, 0.359), (2023, 0.3843), (2024, 0.4213), (2025, 0.4611)))
固定资产投资比例	WITH LOOKUP (Time, ([ (2005, 0)–(2025, 1)], (2005, 0.342), (2006, 0.395373), (2007, 0.452685), (2008, 0.475682), (2009, 0.505122), (2010, 0.547416), (2011, 0.562959), (2012, 0.632036), (2013, 0.70062), (2014, 0.688596), (2015, 0.70614), (2016, 0.679825), (2017, 0.675439), (2018, 0.684211), (2019, 0.671053), (2020, 0.666667), (2021, 0.657895), (2022, 0.649123), (2023, 0.635965), (2024, 0.618421), (2025, 0.614035)))
人均生活污水排放量	WITH LOOKUP (Time ([ (2005, 0)–(2025, 0.01)], (2005, 0.00228994), (2006, 0.00246697), (2007, 0.00250803), (2008, 0.00264556), (2009, 0.00281686), (2010, 0.00309596), (2011, 0.00372927), (2012, 0.0039936), (2013, 0.00408739), (2014, 0.00418), (2015, 0.00419), (2016, 0.00463), (2017, 0.00476), (2018, 0.00466), (2019, 0.00456), (2020, 0.00441), (2021, 0.00433), (2022, 0.004379), (2023, 0.00428), (2024, 0.00426), (2025, 0.00416)))