

基于系统动力学的 CCS 产业化模型及稳态研究^①

梁大鹏, 徐春林, 马东海

(哈尔滨工业大学经济与管理学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 在 CO₂ 价值链分析的基础上, 设计了 CCS(碳捕捉与封存技术) 的商业化推广系统, 并针对系统中发电企业、CCS 运营商和 CO₂ 存储地的经济特性构建了该系统的总体均衡模型(GEM)。依据 GEM 模型, 本文进一步构建了 CCS 产业化复杂系统的动力学因果图及流图, 并运用 Vensim 软件对该流图进行了系统仿真及敏感性分析。结果证明: 按照 GEM 模型确定的商业规则运行的 CCS 推广系统存在均衡状态; 而电力企业的采集系数和政府补助则成为保持该均衡状态的稳定性的敏感性因素。

关键词: CCS; 系统动力学; 敏感性分析

中图分类号: F425 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2012)07-0036-14

0 引 言

温室效应已成为全球性的环境问题, 这一问题的直接原因来自于化石能源的消费。而能源消费又是关系到国家经济持续发展的重大问题, 这使得控制温室气体排放越来越成为众多学者关注的焦点。CCS 正是在 CO₂ 排放控制的背景下提出的一个解决方案。CCS 的本质就是通过把 CO₂ 采集并转化成液态或固态, 以一定的技术手段存储在地下或深海, 从而保证 CO₂ 不会进入到大气环境, 这样的技术系统的优势是不会对现有的能源结构造成影响, 且保证了煤炭等化石能源的供应, 保证能源安全^[1-4]。

根据 EU Technology Platform ZEFFPP 的第四工作组的 Making Carbon Capture and Storage Happen in Europe: Markets, Policy and Regulation 研究报告, 未来的 CCS 应该是同天然气以及电网相似的网络结构, 在这个基础网络中, CO₂ 从发电企业经过运输部门传输到封存地, 因此, 整个网络的运行就可以参照天然气以及电力网络的模式来运

行。这就意味着, CCS 不是单纯的一个技术创新和扩散的问题, 而是一个新兴产业的演进过程。作为产业演进过程, 一个完整地系统框架和完善的商业运营模式是必不可少的, 正是在这个系统内的各种运行机制决定了 CCS 产业化的实现。本文正是在这样的背景下对中国未来可能采取的 CCS 商业运行模式进行研究。

对 CCS 的商业运营研究, 目前形成了三条研究主线: 第一条主线是对电站执行零排放战略所需要的投资和运行成本的研究。主要从零排放电站中不同技术形势所对应的运行成本和投资测算, 以此作为制定政策的依据^[5-9]。第二条主线是对零排放电站的民众接受度研究。通常采用调查的方式, 调查电力行业利益相关人对于零排放战略的态度。这也是 CCS 的监管和政策制定的一个重要依据^[10-15]。第三条主线是对行业风险控制的研究, 主要从技术角度分析零排放电站中 CO₂ 泄漏以后可能造成的危害和可选择的风险防范技术手段, 这些研究成果为制定 CCS 监管框架提供了依据。另外, 一些研究从环境管理立法、风险识别

① 收稿日期: 2009-02-23; 修订日期: 2012-05-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70941031; 71073040); 教育部人文社会科学基金资助项目(09YJC790061); 黑龙江省自然科学基金资助项目(QC08C72); 哈尔滨工业大学创新基金资助项目(HIT.NSRIF.2008.59)。

作者简介: 梁大鹏(1974—), 山东栖霞人, 博士, 教授, 博士生导师。Email: ldp0920@hit.edu.cn

与评估的角度提出有效降低 CO₂ 的泄漏风险的方法和制度,同时采用生命周期的方法来评估零排放电站控制温室气体排放的效率和风险.在风险管理方面,关于 CCS 的投资风险也有很多有价值的研究成果.在这些研究中,有少数文献涉及到零排放电站商业推广的时序和路径选择的问题^[16-20].

在中国,关于电力行业推行零排放战略的与零排放电站相关的研究也集中在两个方面,即 CO₂ 的捕获技术和应对气候变化的政策方面.在技术方面,我国的富氧燃烧过程中的 CO₂ 捕获技术已经达到了国际先进水平.各地的燃烧工程研究所,以及气候变化研究机构都致力于这方面的研究^[21-23].在政策层面,更多的研究集中在电力行业的节能减排政策,以及作为一个系统,各种政策对整个系统的运行状况产生影响的机制与效果,针对政策的制定,一些专家学者分别建立了特定的模型用于系统分析^[24-27].还有很多的研究集中在具体节能减排的产业政策,以及某项产业政策对节能减排的影响评价上^[28-30].这些研究为本项目提供了重要的分析框架和研究基础.

CCS 技术系统是一个“技术—企业—产业”的复合系统,其具有高阶次、多变量、多回路和强非线性的反馈结构,系统行为往往具有反直观性、对内部参数变化的不敏感性等特性,因而采用系统动力学(system dynamics, SD)理论与方法建模较传统的数学模型更能充分刻画 CCS 产业系统的非线性结构和动态特征^[31-34].

系统动力学是一门分析研究信息反馈系统的学科,也是一门认识系统问题和解决系统问题的交叉的新的综合的新学科.它是系统科学和管理科学中的一个分支,也是一门沟通自然科学和社会科学等领域的横向学科.美国麻省理工学院的 Forster J W 教授于 1956 年创立了系统动力学,现在已形成了自己的学科体系.它擅长处理“复杂的时变系统”,并且对于许多人们关注的问题,比如大到“城市的兴衰、世界的发展、环境与生态的变化”,小到“一个公司的管理模式、一种产品的开发”,等等给出了人们认为比较合理的解释,所以,系统动力学赢得了政界、企业界、学术界的高度评价.目前,在宏观经济、微观经济、社会与人口、生态与环境、科技与教育、医学、生物学及工程

技术等领域都有许多研究成果.

本文利用 SD 原理和方法建立包含电站、CO₂ 运营商和 CO₂ 存储地在内的 CCS 产业系统,并根据总体均衡模型(GEM),通过仿真比较 CCS 发展过程中的敏感因素以及系统的稳定性特征.本文要解决的科学目标是,什么样的商业运行模式对于 CCS 的推广是最有效的.在这样的总体目标的基础上,可以分解出以下三个子目标:1) 如何构建 CCS 的商业运行系统? 2) 该系统是否能够按照市场化的规则实现稳态? 3) 该系统的敏感因素多大程度上会造成系统的崩溃? 为了回答以上问题,本文首先在 CO₂ 价值链基础上,构建了各系统成员 GEM 模型;然后在 GEM 模型基础上,构建了 CCS 的系统动力学流程图;最后运用 Vensim 软件对构建的系统动力学模型进行仿真,证明系统均衡态的存在,并找到系统的敏感性因素.

1 CCS 的系统动力学建模

1.1 系统动力学建模的特点

系统动力学模型与其它模型方法相比,具有以下优点:1) 适用于处理长期性和周期性的问题;2) 适用于对数据不足的问题进行研究.建模中常常遇到数据不足或某些数据难于量化的问题,SD 借助各要素间的因果关系及有限的数据和一定的结构仍可进行推算分析;3) 对于处理精度要求不高的复杂的社会经济问题,系统动力学能够有效模拟系统中存在的非线性、多反馈和非均衡的特性;4) 能够作长期的、动态的、战略性的仿真分析与研究.

在 CCS 的产业演进过程中具有以下几方面特点:

1) CCS 系统是开放性的. CCS 系统中伴随着 CO₂ 价值链的建立,其外部效应是非常明显的,正是其对减少 CO₂ 污染的促进作用,使得政府有必要在开始以被组织的形式建立起 CCS 系统,在这一点上,政府作为民众的代表,CCS 减排的社会外部效应才是其采取行动的诱因.在 CCS 系统建立到运行的整个过程中都会有其它形式的包括人、财、物乃至信息等资源不断流入到 CCS 系统.也就是说在整个过程中 CCS 系统都是对这些输入流是开放的.

2) CCS 系统是非平衡的系统. 就产业来讲, 由于产业中子系统以及各子系统内部的企业异质性, 产业的非平衡特征是一种常态. CCS 是一个非平衡系统, 而不是一个与环境没有任何广义资源交流的不变状态.

3) CCS 系统是非线性的系统. CCS 产业同样不是资金或者人力等资源的简单叠加, 其内部各要素之间的相互作用是非线性的. 其中有一些因素对于系统起到加强的正向作用, 另外一些则是减弱的负向作用. 系统内成员就在两种机制的共同作用下做出决策, 这就使得其行为必然是非线性的. 此外, 由于系统因素间相互影响的多样性与复杂性, 总的来看, 非线性是一种常态.

由于 CCS 产业演进系统的这些特性, 采用系统动力学模型能够有效地模拟 CCS 系统运行特点和动态变化规律.

1.2 基本假设及系统构成

由于 CCS 目前还没有成熟的商业运营模式, 所以对系统动力学模型作出如下假设:

假设 1 中国对 CO₂ 排放征收排放税. 实际上, 关于碳税的征收一直是中国争议很大的问题. 如果没有碳税的外部成本内部化的作用, 企业不会主动承担对 CO₂ 排放的控制义务.

假设 2 建立相应的排放权交易市场. 类似于欧洲的 EU ETS 等市场化工具必须在排放权交易市场下才能发挥功能, 系统的参与者才能运用这些工具来实现 CO₂ 的价值流动.

假设 3 建立监管框架和信息共享机制. 诸如法律、污染处理规则、静态产业信息共享等要素能够保证系统成员之间的决策准则一致性, 不会因为非市场化行为的出现而系统崩溃.

假设 4 技术发展不会出现破坏性创新成果. 这样的假设保证了 CCS 不会因为诸如核能等新兴技术的出现而迅速退出市场.

假设 5 所有成员确定参数的原则不变, 即给定的整个模拟周期内, 参数变化遵循连续同向的变化规律. 这样能够避免系统成员在仿真运行周期内, 不断做出相机决策从而导致系统表现过分复杂.

假设 6 完全商业化的前提是 CO₂ 的商业价值在运营过程中逐步被开发出来, 这样的假设能够保证未来的商业模式能够不依靠政府的支持而正常运行.

1.3 CCS 系统的总体均衡模型

CCS 系统包括三个主要阶段, 即 CO₂ 的采集阶段、运输阶段和存储阶段. 在不同的阶段, CO₂ 实现价值的转移和交换. 作为价值链的始点, 电站首先要对 CO₂ 的排放承担义务, 如果电站的排放数量超标, 就面临三个选择: 第一是在碳交易市场上购买 CERs; 第二是向政府交纳高额的排放税; 第三是通过 CCS 来减少 CO₂ 的排放数量. 对这三个选择, 电站要投入用于 CO₂ 采集的改造投资, 弥补投资的途径来自于向 CCS 运营商销售 CO₂ 的收入和清洁电价所带来的收益增加.

CCS 的运营商负责从电站购入 CO₂, 并销售给终端用户, 并承担 CO₂ 的运输活动. CO₂ 的销售主要用于三个方面: 第一是直接销售给那些把 CO₂ 作为生产原材料的企业, 例如制药、饮料、化工等企业; 第二是销售给特定的行业用于特殊用途, 例如石油行业的 EOR, 煤炭开采行业 CO₂-ECBM 等; 第三是出售给存储地直接封存. 前两类销售可以开发 CO₂ 的使用价值, 存在于 CO₂ 的价值链上的潜在市场之中, 如何开发这些潜在市场是 CCS 推广最重要的环节. 第三类销售并没有开发 CO₂ 的使用价值, 只是减少了 CO₂ 进入大气中所造成的温室效应, 所以产生了外部收益, 政府作为公众利益的代表应该实现运营商的外部收益内部化.

CO₂ 价值链的终端主要由两部分构成: 第一类是能够最终使用 CO₂, 并将其转化成产品或者用于增产的企业, 例如石油、煤炭、饮料和化工等行业以营利为目的的企业, 本文称之为存储商; 第二类是由政府出资成立的按照财政预算运行的实体, 本文称之为存储地. 存储地主要是合格的地下或者深海盐水层的存储地点. 这些地点经过详细的地质调查, 能够保证 CO₂ 有效地被封存起来. 随着 CO₂ 潜在价值的不断开发, 存储地所占 CO₂ 终端的份额将减少.

这样的 CCS 产业化模型中包含了 CO₂ 采集者、运输者、存储地和存储商四个子系统. 这四个子系统之间存在着 CO₂ 流和资金流的分配, 并由此形成反馈结构关系. 在 CCS 的四个子系统中, 分别包含了变量 x , y , z , 这些变量被划分成三种状态, 即状态变量、速率变量和辅助变量. 状态变量 z 只受到速率变量的影响, 而且它还能影响到辅助变量的变化. 速度变量 x , y 和辅助变量 r 相互

影响. 在采集者系统 I 中, 包含的水平变量和速率变量包括 $x_i, y_i, z_i (i = 1, 2, \dots, I)$, 运输者系统 J 中的水平变量和速率变量包括 $x_j, y_j, z_j (j = 1, 2, \dots, J)$, 存储地系统 S 和存储商 B 中的水平变量和速率变量分别为 $x_s, y_s, z_s (s = 1, 2, \dots, S)$ 和 $x_b, y_b, z_b (b = 1, 2, \dots, B)$, 系统中的辅助变量 r_1 到 r_p 则对这四个子系统中的速率变量产生影响.

这样可以构建系统的状态变量方程

$$z(t + \Delta t) = z(t) + \Delta t [x(t) - y(t)]$$

速率变量方程

$$x = f(r_1, r_2, \dots, r_p)$$

$$y = g(r_1, r_2, \dots, r_p)$$

辅助变量方程

$$r_p = f(x, y, z, r_1, \dots, r_{p-1}, r_p) \quad (p = 1, 2, \dots, P)$$

这是 CCS 的系统动力学基础模型. 在这个模型中, 把 x, y 和 r_p 作为系统动力学模型中的敏感性因素, 就可以通过多目标的规划模型模拟仿真整个系统的运行过程. 运行的过程需要实现的目标如下:

$$\begin{cases} \text{opt } f_i(x, y, r_1, \dots, r_p) \\ \text{opt } f_j(x, y, r_1, \dots, r_p) \\ \text{opt } f_s(x, y, r_1, \dots, r_p) \\ \text{opt } f_b(x, y, r_1, \dots, r_p) \\ \text{s. t.} \\ g(x, y, r_1, \dots, r_p) \leq A \end{cases}$$

其中 f_i, f_j, f_s, f_b 分别代表采集者、运输者、存储地

和存储商的目标函数, $g(x, y, r_1, \dots, r_p) \leq A$ 是各子系统中的约束条件, A 为可用投资量.

2 CCS 的系统流图构建

在 CCS 系统中存在着 8 个反馈环(见图 1). 其中, 政府向发电企业和存储地进行补贴, 从而引起理论 CO_2 数量(即按照现有技术, 可能排放的 CO_2 数量)的变化, 理论 CO_2 能够通过电站对 CO_2 采集、排放权转让或者交纳排放税后直接排放来实现. 这样就形成了左边的 4 个负反馈环. 在因果图的右侧, 政府向运营商和存储商进行补贴, 从而分别使得运营商和存储商的运营和 CO_2 使用能力的提高, 进而提高到 CO_2 的采集量而减少 CO_2 的排放量, 同样的原理, 就形成了右侧的 2 个正反馈环和 2 个负反馈环. 整个系统正是在这样的正负反馈的作用下实现了整体的均衡态. 本文将政府补贴中影响电站采集技术和存储地的 CO_2 存储技术的投资称为第一类投资, 相应的技术水平成为第一类技术; 政府补贴中影响运营商 CO_2 运输技术和存储商的 CO_2 使用技术的投资称为第二类投资, 相应的技术水平成为第二类技术, A 为可用投资量.

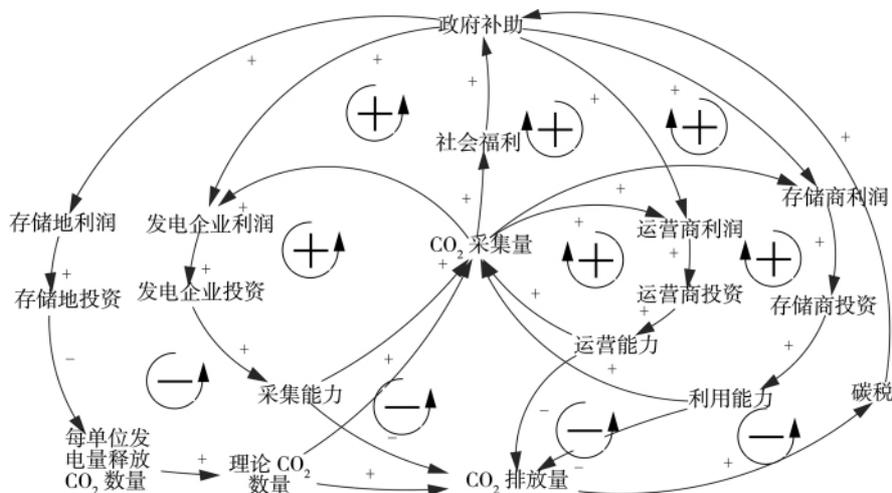


图 1 CCS 系统商业运营模式中的因果图

Fig. 1 The causality diagram of CCS business system

根据因果图和总体均衡模型, 本文描述出整个 CCS 运营系统的流图(见图 2).

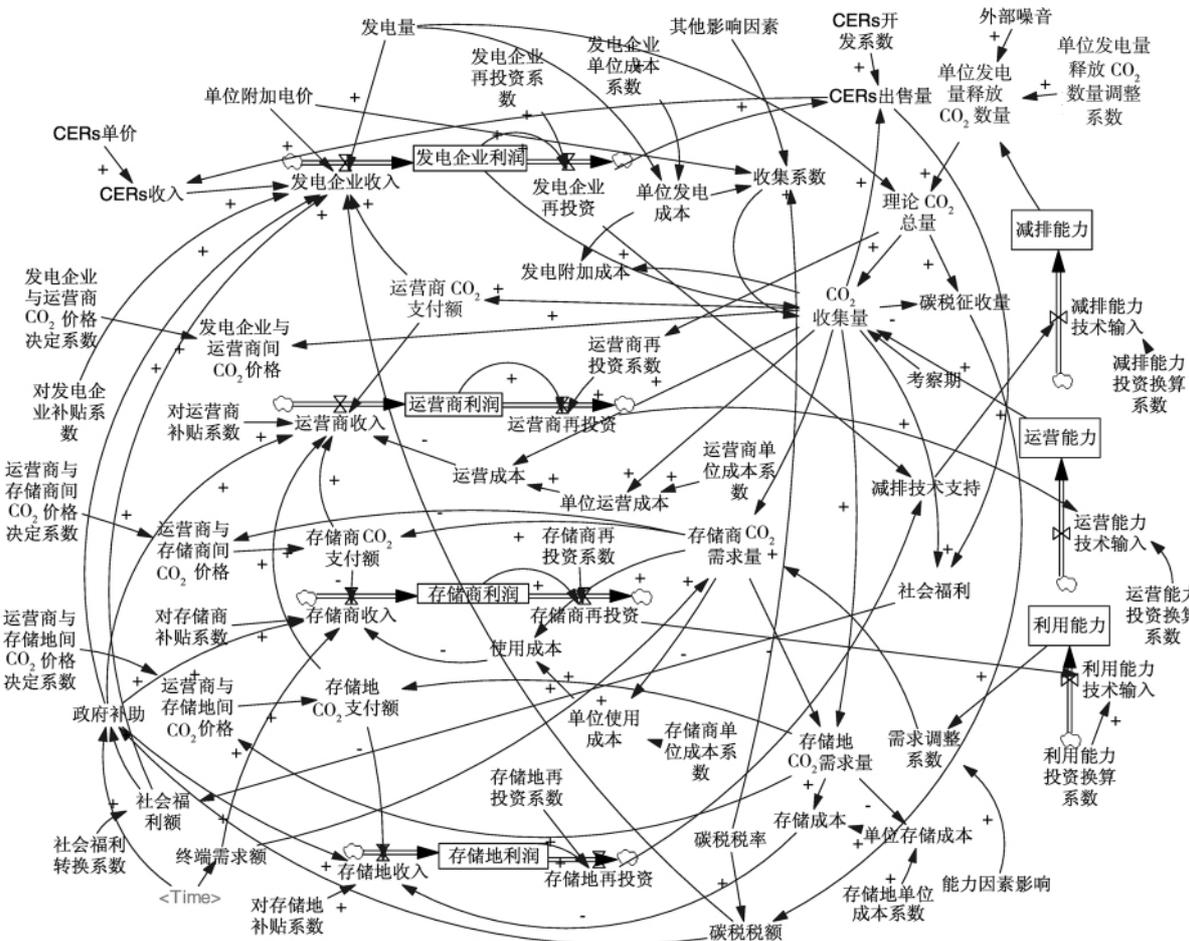


图2 CCS产业系统运营模式流图

Fig.2 The flow chart diagram of CCS business system

在图2中,存在7个水平变量,分别是发电企业利润、运营商利润、存储商利润、存储地利润和CO₂减排能力、运营能力以及利用能力. 根据各自水平变量所相关的影响因素,可以确定其它11个速率变量和64个辅助变量或常数. 这7个水平变量中,利润水平变量由相应的进入的年净收入和漏出的年再投资的速率变量所决定. 技术能力水平变量则受到各成员的投资的速率变量影响,即CO₂减排能力的技术输入,运营能力的技术输入和利用能力的技术输入.

首先,对于整个系统来讲,政府补助(ZFBZ)的确定十分关键,这是因为CCS系统的建立对于各成员来说是一个高投资、高不确定性的项目,因而其主观投资积极性不高,所以政府有必要对不同的经济主体给予适当的直接经济补助以推动系统的建立以及运行. 政府补助的来源包括两方面:

一方面是发电企业上缴的碳税税额(TSSE). 碳税税额等于碳税税率(TSSL)乘以CO₂的排放量(PEL),其中CO₂排放量等于CO₂的理论产生总量(LLZL)与CO₂采集量(CJL)的差. 这是因为在系统建立初期,CO₂排放量大,所以发电企业所上缴的碳税也多. 此时政府相关部门应该给予系统充分的财政帮助以促成系统的进化. 当系统良好运行的时候,CO₂全部被采集也就是发电企业不再需要上缴碳税的时候,政府也就没有必要再向系统注资;另一方面是社会福利额(SHFLE). CCS系统的建立实现了CO₂的减排,增加了社会福利,因此政府作为民众的代表可以为此对相关主体支付. 理论上可以由CO₂的采集量乘以一个社会福利转化系数(FLZHXS)计算出社会福利额,对于变量FLZHXS的数量化是一个主观决策过程,它本质上是社会对于减排CO₂的价值的承认. 在计

算出这两部分资金来源之后,相关政府部门就可以对此再乘以政府补助支付系数(BZZFXS)来确定具体的政府补助支付额,其中变量(BZZFXS)体现了政府补助的力度和调控手段,它通过对政府补助资金来源的倍增或倍减来控制政府补助额度.政府补助的相关方程如下:

$$A \text{ ZFBZ. K} = (\text{TSSE. K} + \text{SHFLE. K}) * \text{BZZFXS. K}$$

$$C \text{ BZZFXS. K} = ()$$

$$A \text{ TSSE. K} = \text{TSSL. K} * \text{PEL. K}$$

$$C \text{ TSSL. K} = ()$$

$$A \text{ PFL. K} = \text{LLZL. K} - \text{CJL. K}$$

$$A \text{ SHFLE. K} = \text{FLZHXS. K} * \text{CJL. K}$$

$$C \text{ FLZHXS. K} = ()$$

对CO₂价值链中的采集部门也即发电企业(电站)来说,可依据其经济属性分析建立方程组,其中状态变量为电站利润(DZLR),对其产生作用的速率变量包括电站的年收入(DZSR)和电站的年再投资(DZTZ).其中的电站年再投资变量的形式比较简单,可以用电站的利润与电站再投资系数(DZTZXS)的乘积来计算;对于电站的年收入速率变量来说,对于其起到正相作用的辅助变量包括:1)电网公司的清洁电价补贴(DJBT),这一变量等于发电量(FDL)与单位附加电价(DWFJDJ)的乘积;2)政府补助中支付给电站的部分(DZZFBZ),也就是政府补助与对电站补贴系数(DZBZXS)的乘积;3)CDM收入(CDMSR),这一变量等于电站CERs出售量(CDMXL)与CERs单价(CDMDJ)的乘积.其中核准减排量需要相关部门确定,本文假设发电企业获得的核准减排量等于出售的CO₂数量;4)运营商向电站支付的CO₂购入金额(YYSZF),这一变量等于电站和运营商之间的CO₂交易量(DYJYL)与电站和运营商之间的CO₂的交易单价(DYJYDJ)的乘积,本文假设电站所采集的CO₂没有泄露,所以CO₂的采集量(CJL)也就等于变量DYJYL,其中变量CJL将同时受到整个系统中成员的相关因素的约束,这里需要引入的影响变量首先包括电站的收集系数(DZSJXS),这是一个电站的主观因素,其等于碳税税率(TSSL)乘以单位附加电价再除以单位附加发电成本(DWFJCB)的值和电站主观采集倾向(DZZGQX)的乘积.电站以这一变量与其利润水

平的乘积为依据确定CO₂的意愿采集量;其次,从客观上讲,CO₂的交易量一方面要受到CO₂的理论产生总量(LLZL)的约束,其等于发电量(FDL)与每单位发电量释放CO₂数量(DWDLSL)的乘积,此处变量DWDLSL将受到存储地的减排能力(JPNL)的影响;另一方面还要受到电站的采集能力(CJNL)的约束,而采集能力将由电站的再投资与采集能力投资换算系数(DZZHXS)的乘积构成的采集能力技术输入(DZJSSR)所决定.最后,这一变量还将受到运营商的运营能力(YYNL)的约束.对于其起到负相作用的辅助变量包括:1)碳税税额(TSSE);2)电站采集改造成本(GZCB),这一变量等于单位附加成本(DWFJCB)与CO₂采集量(CJL)的乘积.其中变量DWFJCB由电站的采集能力所决定,随着采集能力的不断开发,发电企业的单位附加发电成本也将减小.因此,电站的相关方程如下:

$$L \text{ DZLR. K} = \text{DZLR. J} + \text{DT} * (\text{DZSR. JK} - \text{DZTZ. JK})$$

$$R \text{ DZSR. KL} = \text{function}(\text{DJBT. K}, \text{DZZFBZ. K}, \text{CDMSR. K}, \text{YYSZF. K}, \text{TSSE. K}, \text{GZCB. K})$$

$$R \text{ DZTZ. KL} = \text{DZLR. K} * \text{DZTZXS. K}$$

$$A \text{ DZTZXS. K} = \text{IF THEN ELSE} ()$$

$$A \text{ DJBT. K} = \text{DWFJDJ. K} * \text{FDL. K}$$

$$C \text{ DWFJDJ. K} = ()$$

$$C \text{ FDL. K} = ()$$

$$A \text{ DZZFBZ. K} = \text{ZFBZ. K} * \text{DZBZXS. K}$$

$$C \text{ DZBZXS. K} = ()$$

$$A \text{ CDMSR. K} = \text{CDMDJ. K} * \text{CDMXL. K}$$

$$C \text{ CDMDJ. K} = ()$$

$$A \text{ CDMXL. K} = \text{DYJYL. K}$$

$$A \text{ YYSZF. K} = \text{DYJYDJ. K} * \text{DYJYL. K}$$

$$C \text{ DYJYDJ. K} = ()$$

$$A \text{ DYJYL. K} = \text{CJL. K}$$

$$A \text{ CJL. K} = \text{min}(\text{min}(\text{min}(\text{max}(\text{DZLR. K}, 0) * \text{DZSJXS. K}, \text{LLZL. K}), \text{CJNL. K}), \text{YYNL. K})$$

$$A \text{ DZSJXS. K} = (\text{TSSL. K} * \text{DWFJDJ. K} / \text{DWFJCB. K}) * \text{DZZGQX. K}$$

$$C \text{ DZZGQX. K} = ()$$

$$A \text{ DWFJCB. K} = \text{function}(\text{CJNL. K})$$

$$A \text{ LLZL. K} = \text{FDL. K} * \text{DWDLSL. K}$$

$$A \text{ DWDLSL. K} = \text{function}(\text{JPNL. K})$$

$L \text{ CJNL. K} = \text{CJNL. J} + \text{DT} * \text{DZJSSR. JK}$
 $R \text{ DZJSSR. JK} = \text{SMOOTH}(\text{MAX}(\text{DZTZ. JK} * \text{DZZHXS. K}, 0), 1)$
 $A \text{ DZZHXS. K} = \text{IF THEN ELSE}()$
 $A \text{ GZCB. K} = \text{DWFJCB. K} * \text{CJL. K}$

CO_2 运营商方程组中, 状态变量为运营商利润(YYLR), 其由两个速率变量所决定, 运营商的年收入(YYSR) 和运营商的年再投资(YYTZ). 其中变量YYTZ的形式比较简单, 可以用运营商的利润与运营商再投资系数(YYTZXS)的乘积来计算; 对于运营商的年收入速率变量来说, 对于其起到正相作用的辅助变量包括: 1) 政府补助中支付给运营商的部分(YYZFBZ), 也就是政府补助与对运营商补贴系数(YYBZXS)的乘积; 2) 存储商对运营商的 CO_2 购入额支付(CCSZF), 这一变量的数值等于运营商与存储商之间的 CO_2 交易数量(YSJYL) 与运营商与存储商之间的 CO_2 交易单价(YSJYDJ)的乘积. 其中变量YSJYL将由存储商的 CO_2 需求所决定; 存储地对运营商的 CO_2 购入额支付(CCDZF), 同理这一变量的数值将由运营商与存储地之间的 CO_2 交易数量(YDJYL)乘以相应的 CO_2 单价(YDJYDJ)所确定, 其中变量YDJYL所代表的 CO_2 是指运营商的运营量(YYL) 减去存储商的 CO_2 需求量的部分. 而对于其起到负相作用的辅助变量包括: 1) 运营商对发电企业的 CO_2 购入额支付(YYSZF), 这一变量的数值的方程已经在上述内容中给出; 2) 运营商的运营成本(YYCB), 这一变量等于单位运营成本(DWYYCB) 与 CO_2 运营量(YYL)的乘积; 3) 变量DWYYCB由运营商的运营能力(YYNL)所决定, 随着运营能力的不断开发, 运营商的单位运营成本也将减小. 其中运营商对运营技术的再投资与利用能力转化系数(YYZHXS)的乘积构成了运营技术的技术输入(YYJSSR) 是运营商的运营能力的决定因素. 因此, 运营商的相关方程如下:

$L \text{ YYLR. K} = \text{YYLR. J} + \text{DT} * (\text{YYSR. JK} - \text{YYTZ. JK})$
 $R \text{ YYSR. KL} = \text{function}(\text{YYZFBZ. K}, \text{CCSZF. K}, \text{CCDZF. K}, \text{YYSZF. K}, \text{YYCB. K})$
 $R \text{ YYTZ. KL} = \text{YYLR. K} * \text{YYTZXS. K}$
 $A \text{ YYTZXS. K} = \text{IF THEN ELSE}()$

$A \text{ YYZFBZ. K} = \text{ZFBZ. K} * \text{YYBZXS. K}$
 $C \text{ YYBZXS. K} = ()$
 $A \text{ CCSZF. K} = \text{YSJYDJ. K} * \text{YSJYL. K}$
 $C \text{ YSJYDJ. K} = ()$
 $A \text{ YSJYL. K} = \text{CSSJL. K}$
 $A \text{ CCDZF. K} = \text{YDJYDJ. K} * \text{YDJYL. K}$
 $C \text{ YDJYDJ. K} = ()$
 $A \text{ YDJYL. K} = \text{YYL. K} - \text{YSJYL. K}$
 $A \text{ YYL. K} = \text{DYJYL. K}$
 $A \text{ YYCB. K} = \text{DWYYCB. K} * \text{YYL. K}$
 $A \text{ DWYYCB. K} = \text{function}(\text{YYNL. K})$
 $L \text{ YYNL. K} = \text{YYNL. J} + \text{DT} * \text{YYJSSR. JK}$
 $R \text{ YYJSSR. JK} = \text{SMOOTH}(\text{MAX}(\text{YYTZ. JK} * \text{YYZHXS. K}, 0), 5)$

$A \text{ YYZHXS. K} = \text{IF THEN ELSE}()$

CO_2 存储商方程组中, 状态变量为存储商利润(CSLR), 其由两个速率变量所决定, 即存储商的年收入(CSSR) 和存储商年再投资(CSTZ). 其中变量CSTZ的形式比较简单, 可以用存储商的利润与存储商再投资系数(CSTZXS)的乘积来计算; 对于存储商的收入速率变量来说, 对于其起到正相作用的辅助变量包括: 1) 政府补助中支付给存储商的部分(CSZFBZ), 也就是政府补助与对存储商补贴系数(CSBZXS)的乘积; 2) 终端产品的销售收入(ZDXSSR), 值得注意的是这一变量并不等于终端需求额(ZDXQE), 而是与存储商的 CO_2 实际需求量(CSSJL)相联系的变量. 因为对于存储商来说, 用于增产终端产品的 CO_2 需求量不仅仅受限于终端产品的需求, 同时还受到系统内的采集能力、运营能力和使用能力的约束.

在 CCS 系统建立初期, 由于系统各成员相应的能力开发不足, 整个系统无法满足终端的需求也就无法获得等于终端需求额的收入. 此处引入辅助变量终端需求吸收(ZDXQXS), 其含义为存储商为满足每单位终端需求额而需要消耗的 CO_2 的数量. 随着存储商使用能力(SYNL)的开发, 这一变量将逐渐增大, 这符合边际产量递减的原理. 因此, 存储商在得到变量CSSJL和ZDXQXS之后, 就可以求得其比值也就是其终端产品的销售收入, 同时从此处可知存储商的 CO_2 实际需求量是同时满足采集能力、运营能力、使用能力和终端需

求的引致 CO₂ 需求量 (ZDYZL) 多个约束的变量. 存储商对使用技术的再投资与利用能力转化系数 (CSZHXS) 的乘积构成了使用技术的技术输入 (CSJSSR) 影响到存储商的使用能力. 而对于其起到负相作用的辅助变量包括: 1) 存储商对运营商的 CO₂ 购入额支付 (CCSZF), 同上述分析这一变量的数值等于存储商与运营商之间的 CO₂ 交易数量 (YSJYL) 与存储商与运营商之间的 CO₂ 交易单价 (YSJYDL) 的乘积; 2) 存储商的使用成本 (SYCB), 这一变量等于单位使用成本 (DWSYCB) 与 CO₂ 实际需求量 (CSSJL) 的乘积. 其中变量 DWSYCB 由存储商的运营能力所决定, 随着使用能力的不断开发, 存储商的单位使用成本也将减小. 因此, 存储商的相关方程如下:

$$L \text{ CSLR. K} = \text{CSLR. J} + \text{DT} * (\text{CSSR. JK} - \text{CSTZ. JK})$$

$$R \text{ CSSR. KL} = \text{function}(\text{CSZFBZ. K}, \text{ZDXQSR. K}, \text{CCSZF. K}, \text{SYCB. K})$$

$$R \text{ CSTZ. KL} = \text{CSLR. K} * \text{CSTZXS. K}$$

$$A \text{ CSTZXS. K} = \text{IF THEN ELSE}()$$

$$A \text{ CSZFBZ. K} = \text{ZFBZ. K} * \text{CSBZXS. K}$$

$$C \text{ CSBZXS. K} = ()$$

$$A \text{ ZDXSSR. K} = \text{CSSJL. K} / \text{ZDXQXS. K}$$

$$A \text{ ZDXQXS. K} = \text{function}(\text{SYNL. K})$$

$$L \text{ SYNL. K} = \text{SYNL. J} + \text{DT} * \text{CSJSSR. JK}$$

$$R \text{ CSJSSR. JK} = \text{SMOOTH}(\text{MAX}(\text{CSTZ. JK} * \text{CSZHXS. K}, 0), 10)$$

$$A \text{ CSZHXS. K} = \text{IF THEN ELSE}()$$

$$A \text{ CSSJL. K} = \text{min}(\text{SYNL. K}, \text{ZDYZL. K})$$

$$A \text{ ZDYZL. K} = \text{ZDXQE. K} * \text{ZDXQXS. K}$$

$$C \text{ ZDXQE. K} = ()$$

$$A \text{ SYCB. K} = \text{DWSYCB. K} * \text{CSSJL. K}$$

$$A \text{ DWSYCB. K} = \text{function}(\text{SYNL. K})$$

CO₂ 存储地的方程组中, 状态变量为存储地利润 (CDLR), 其由两个速率变量所决定, 即存储地的年收入 (CDSR) 和存储地的年再投资 (CDTZ). 其中变量 CDTZ 的形式比较简单, 可以用存储地的利润与存储地再投资系数 (CDTZXS) 的乘积来计算; 对于存储地收入速率变量来说, 对于其起到正相作用的辅助变量只有政府补助中支付给存储地的部分 (CDZFBZ), 也就是政府补助

与对存储地补贴系数 (CDBZXS) 的乘积. 而对于其起到负相作用的辅助变量包括: 1) 存储地对运营存储商的 CO₂ 购入额支付 (CCDZF), 同上述分析这一变量的数值等于运营商与存储地之间的 CO₂ 交易数量 (YDJYL) 与运营商与存储地之间的 CO₂ 交易单价 (YDJYDJ) 的乘积; 2) 存储地的存储成本 (CCCB), 这一变量等于单位存储成本 (DWCCCB) 与 CO₂ 存储量 (CCL) 的乘积. 本文假设存储地的再投资有两个用途: 一方面是研发可以减少 CO₂ 产生的技术, 也就是降低 CCS 系统中每单位发电量释放 CO₂ 数量的值; 另一方面是降低单位存储成本. 所以变量 DWCCCB 由存储地的减排能力 (JPNL) 所决定, 随着减排能力的不断开发, 存储地的单位存储成本也将减小. 其中存储地对存储技术的再投资与利用能力转化系数 (CDZHXS) 的乘积构成了存储技术的技术输入 (CDJSSR) 是存储地的存储能力的决定因素. 因此, 存储地的相关方程如下:

$$L \text{ CDLR. K} = \text{CDLR. J} + \text{DT} * (\text{CDSR. JK} - \text{CDTZ. JK})$$

$$R \text{ CDSR. KL} = \text{function}(\text{CDZFBZ. K}, \text{CCDZF. K}, \text{CCCB. K})$$

$$R \text{ CDTZ. KL} = \text{CDLR. K} * \text{CDTZXS. K}$$

$$A \text{ CDTZXS. K} = \text{IF THEN ELSE}()$$

$$A \text{ CDZFBZ. K} = \text{ZFBZ. K} * \text{CDBZXS. K}$$

$$C \text{ CDBZXS. K} = ()$$

$$A \text{ CCCB. K} = \text{DWCCCB. K} * \text{CCL. K}$$

$$A \text{ DWCCCB. K} = \text{function}(\text{JPNL. K})$$

$$L \text{ JPNL. K} = \text{JPNL. J} + \text{DT} * \text{CDJSSR. JK}$$

$$R \text{ CDJSSR. JK} = \text{SMOOTH}(\text{MAX}(\text{CDZHXS. K}, 0), 10)$$

$$A \text{ CDZHXS. K} = \text{IF THEN ELSE}()$$

$$A \text{ CCL. K} = \text{YDJYL. K}$$

至此, 系统的全部方程已经建立起来. 但是方程并没有赋予具体的数值, 同时还有一些函数形式需要确定. 只有这些工作全部完成之后, 使用 Vensim 软件对模型进行仿真模拟才能真正实现定性分析与定量分析的结合. 上述的方程数目较多, 同时不同方程中变量存在着明显的相互关联, 常规的定量方法难以对这类反馈方程求解. 这也再次说明了系统动力学方法在 CCS 系统推广研究中的适用性.

表 1 主要的外部参数

Table 1 Primary exogenous variables

名称	数值	影响变量	变量的解释
单位附加电价	0.002 187 \$ /kwh	收集系数、发电企业收入	目前的平均发电成本,考察了 10 家以上的发电公司数据后得到的
CERs 单价	RANDOM UNIFORM (13.6* 0.9, 13.6* 1.1 , 0) \$ /t	发电企业收入	目前在中国没有碳排放市场,所以根据设立在德国的欧洲能源交易所的碳排放权期货价格的均值水平加上随机波动率确定
发电量	RANDOM UNIFORM(4.75e + 006* 0.9, 4.75e + 006* 1.1 , 0) kwh/year	理论 CO ₂ 总量、发电企业收入	根据中等规模的普通燃煤电站的发电能力确定
碳税税率	50 \$ /t	收集系数、政府补助	该指标在中国没有数据,根据欧洲碳税水平及国内学者的研究成果综合确定
政府对发电企业补贴系数	25%	发电企业收入	该指标为敏感性分析指标,初始值是假设情景
发电企业与运营商间 CO ₂ 价格	RANDOM UNIFORM(500* 0.145 8* 0.9, 500* 0.145 8* 1.1 , 0) \$ /t	发电企业收入、运营商收入	该指标没有实际数据,参照目前国内 CO ₂ 商业用途价格,假设为一个随机波动变量
单位运营成本	[6, 17] \$ /t	运营商收入	根据参考文献中对欧洲 CO ₂ 运输和存储成本数据确定
单位存储成本	[1.297 6,10.380 8] \$ /t	存储地收入	根据参考文献中对欧洲 CO ₂ 运输和存储成本数据确定
单位发电量释放 CO ₂ 量	[0.000 873, 0.001 05] t/kwh	理论 CO ₂ 总量	根据目前电厂的活动水平和排放因子测算

注: 本文采用美元与人民币的兑换比例为 1:6.86,欧元对美元的兑换比例为 1:1.297 6

3 系统仿真

本文把电站定义为中等规模的 IGCC 电站. 运用 Vensim 软件对建立起的模型进行仿真,连续仿真 50 年,间隔为一年,模型通过了 model check 和 unit check 两项检验. 仿真结果显示为图 3 和图 4.

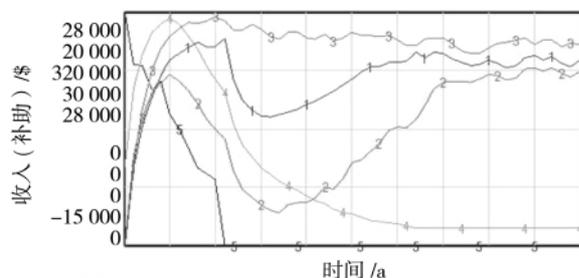


图 3 CCS 系统各成员累积收入图

Fig.3 Accumulative income of CCS participants

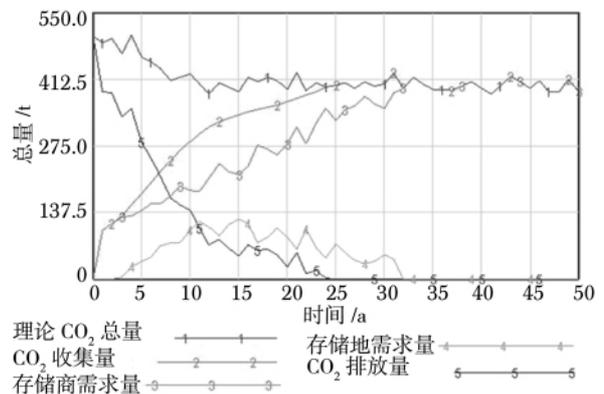


图 4 CCS 系统中 CO₂ 流量图

Fig.4 CO₂ quantity in CCS system

结果显示,系统中各成员的收入从第 30 年开始趋于稳态,这意味着系统均衡. 图 4 表示系统中 CO₂ 流随着系统运行的状态,一方面存储商由于技术进步以及终端需求的增加会增加其对 CO₂ 的需求,如曲线 3 所示. 因此,CO₂ 的采集量将越来越大,如曲线 2 所示;另一方面,理论 CO₂ 数量由于技术的进步将逐渐减少直至一个稳态值,这是技术进步对每单位

发电量释放 CO₂ 数量的影响的极限值,如图 4 曲线 1 所示. CO₂ 的采集量与 CO₂ 的排放量之和为理论 CO₂ 数量,所以 CO₂ 的采集量将达到理论 CO₂ 的稳态值而 CO₂ 的排放量将逐渐减少到零. 曲线 3 与曲线 4 的和为 CO₂ 的采集量,因此,作为单纯追求减排 CO₂ 增加社会福利的存储地,其 CO₂ 需求则不断减少,如图 4 中曲线 4 所示.

由图 3 和图 4 的运行结果来看,当系统运行至存储地需求量减少为零的时刻,也就是所采集的 CO₂ 已经全部由存储商所消耗的时候,系统进入稳定状态,在这种情况下,系统各经济成员将完全按照市场化的规则来进行运作,系统状态由发电企业,运营商和存储商三个经济主体的市场化行为所决定. 这就证明了按照 GEM 规则建立起来的商业化 CCS 推广系统稳态的存在.

4 系统敏感性分析

4.1 采集系数

系统的敏感性分析显示,电站的采集系数和政府补贴两个变量导致系统进入警戒状态的程度远远高于其它变量. 因此,本文选择这两个变量作为 CCS 系统的敏感性因素.

模型中的采集系数被定义为: 发电企业的年 CO₂ 采集量与由于 CO₂ 采集所获得的预期累积收入的比值. 根据假设 5,在系统运行的周期内,采集系数不再变化,发电企业则可以根据上一年的收入累计的状况与采集系数的乘积来判断下一年的 CO₂ 采集量. 为考查采集系数对于系统的影响,在其它变量不变的前提下采集系数减少 10% 和增加 10% 与原系统进行对照分析采集系数的作用. 模拟结果如下:

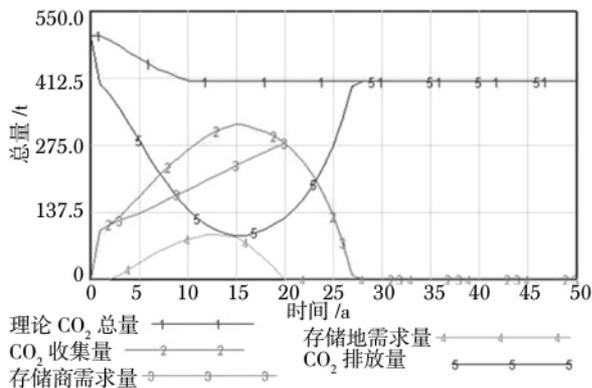


图 5.1a 碳税税率降低致使对 CO₂ 流的影响
Fig. 5.1a Effect of carbon tax on CO₂ flow

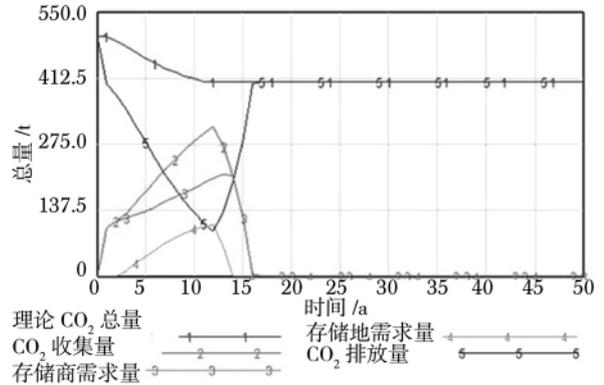


图 5.1b 采集成本对 CO₂ 流的影响
Fig. 5.1b Effect of capture cost on CO₂ flow

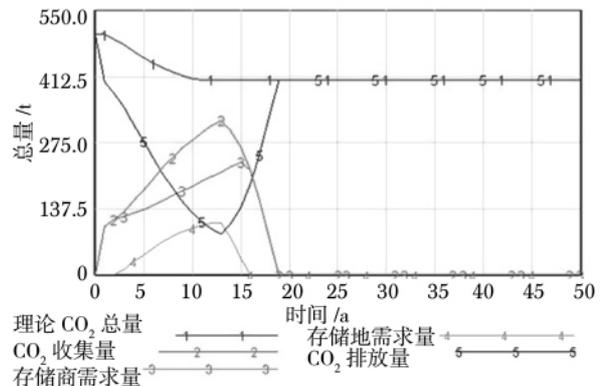


图 5.1c 补贴电价降低对 CO₂ 流的影响
Fig. 5.1c Effect of price subsidy on CO₂ flow

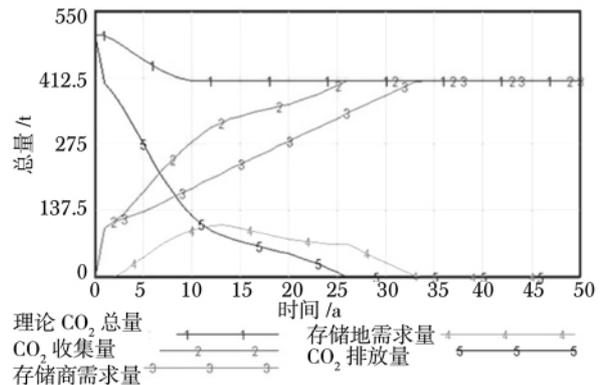


图 5.1d 采集系数对 CO₂ 流的影响
Fig. 5.1d Effect of capture ratio on CO₂ flow

因为采集系数与单位附加电价和碳税税率成正向关系,与 CO₂ 的单位采集成本成反比. 因此,其变化 10% 可以通过降低碳税税率,提高单位采集成本和降低补贴电价这三个途径来实现. 图 5.1a、图 5.1b 和图 5.1c 分别表示这三个途径的模拟结果,图 5.1d 表示运用三种方法提高采集系数后系统中 CO₂ 流的变动状况.

通过三种不同方式降低采集系数后,系统的

运行趋势是相同的,即系统在运行一段时间后,发电企业将进入到持续的亏损状态,并最终退出系统而使得系统崩溃.此时,三幅图中CO₂采集量曲线减少至零.这是因为发电企业在改造前预测的主观采集意愿不足,因此CO₂的排放量偏大,相应的碳税成本支出大,于是发电企业的收入较预测值较小,发电企业的收支状况恶化.最终,发电企业出现入不敷出的状况而导致系统的崩溃.

以上分析证明采集系数是一个关键变量,它受到其他变量的制约.同时因为它是主观的意愿估计,这个变量的取值很大程度上取决于电力企业的风险偏好,因此,良好的企业家精神是CCS有效推广的微观基础.

4.2 政府补助

给予四种新的情景以考察政府补助的作用,在其它变量不变的前提下,模拟政府补助增加或减少20%而撤出期不变和政府补助不变,撤出期延长或缩短20%的效果.结果如下:

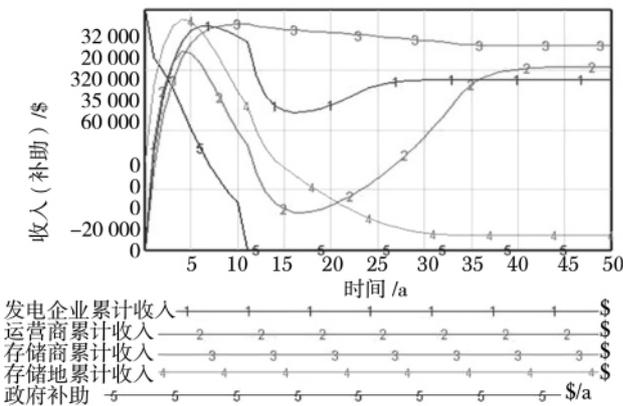


图 5.2a 政府补助额增加对系统成员累积收入的影响

Fig. 5.2a Effect of subsidy increasing on participant income

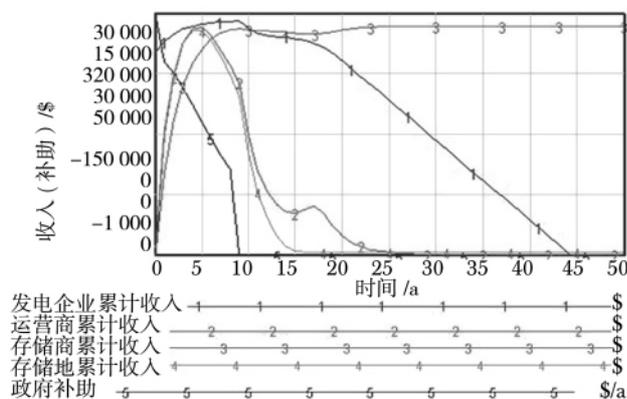


图 5.2b 政府补助额减少对系统成员累积收入的影响

Fig. 5.2b Effect of subsidy decreasing on participant income

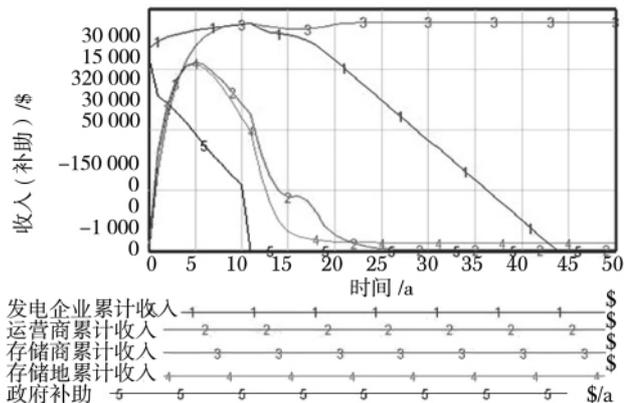


图 5.2c 政府补助时间延长对系统成员累积收入的影响

Fig. 5.2c Effect of prolonged subsidy on participant income

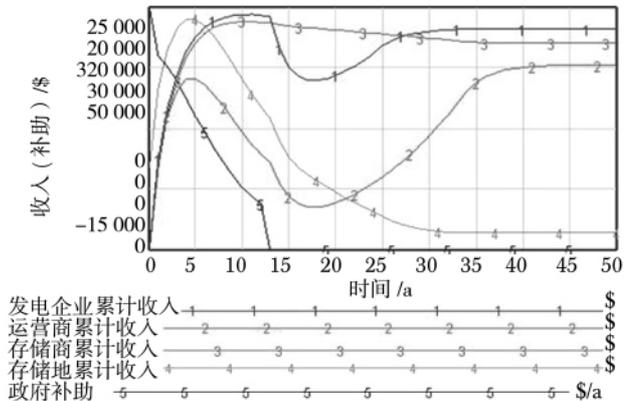


图 5.2d 政府补助时间缩短对系统成员累积收入的影响

Fig. 5.2d Effect of shorten subsidy on participant income

对比结果显示,政府多支付了20%,但对系统稳定的趋势没有影响,只是影响到了模拟结果的具体金额,如图5.2a;若政府少支付了20%,发电企业却面临着持续的负收入,在这样的情况下,发电企业将退出系统而导致整个系统最终崩溃,如图5.2b.

由于发电企业在系统运行的开始对采集系数做出估计,并且在分析期内保持不变.所以政府补助对发电企业的预期累积收入的作用不可忽视.如果发电企业始终保持相同的采集系数,在政府补贴减少20%的情况下,发电企业的意愿CO₂的采集量将会明显不足,而且随着碳税的征收量快速放大,发电企业将面临未预期的碳税压力.仿真结果显示,在这样的情境下,政府补助如果在10年后撤出,发电企业的境况将会迅速恶化,并迅速从系统中退出,进而导致系统崩溃.如果政府将撤出补助的时间延后两年,即在12年后完全撤出,那么与政府增加补助的数额相同,其对系统的稳定趋势没有影响,只是影响到了模拟结果的具体

金额,如图 5.2c; 如果政府缩短了撤出时间的 20%,即政府补助提前撤出 2 年,在这样的情况下,发电企业也将退出系统而导致整个系统最终崩溃,如图 5.2d.

5 结束语

采集系数是影响 CCS 系统稳定的最关键变量,也就是说发电企业的主观减排意愿对于模型能否进入稳态至关重要. 由于这一变量受到碳税税率、补贴电价和单位采集成本的影响,因此,为了使得 CCS 系统保持稳定,以下三个因素必须考虑: 第一,政府必须征收碳税以作为外部的推动力,而且碳税的税率必须足够高才可以起到作用; 第二,政府必须给予采集 CO₂ 的发电企业以足够高的清洁电价涨幅; 第三,需要采集技术的迅速提高来降低单位采集成本. 这三个因素对采集系数

的影响实效不同,最为显著的是采集成本的降低.

政府作为发电企业改造的前期支持者,其支持的强度和支持的周期对于模型进入稳态非常重要. 扶持力度不够或是时间太短对系统的稳定都有明显的不利影响. 同时,过多的补助或是过长的补助时间也会导致政府资源的浪费. 因此,政府关于补助的政策制定者需要综合考虑各种因素,以保证作出的决策可以使得所投入资源的收益最大化.

本文还需要在以下两个方向做进一步研究: 第一,对于投资引起的单位发电量的 CO₂ 释放数量这一参数的确定,因为这个参数也是影响整个系统运行的重要因素. 对这一参数的确定可以采用经济学的边际分析方法进行研究. 第二,如果运营商的职责分别由电站、石油企业和政府来承担,将会对本文设计的 CCS 商业运营系统产生什么样的影响,这是目前 CCS 商业模式研究的一个重要方向.

参考文献:

- [1] Friedmann S J, Dooley J J, Held H, et al. The low cost of geological assessment for underground CO₂ storage: Policy and economic implications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47: 1894 – 1901.
- [2] Akimoto K, Takagi M, Tomoda T. Economic evaluation of the geological storage of CO₂ considering the scale of economy [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1(2): 271 – 279.
- [3] 黄斌, 刘练波, 许世森. 二氧化碳的捕获和封存技术进展 [J]. *中国电力*, 2007, 40(3): 15 – 18.
Huang Bin, Liu Lianbo, Xu Shisen. The development of CO₂ capture and storage, electric power [J]. *China Electric Power*, 2007, 40(3): 15 – 18. (in Chinese)
- [4] 费维扬, 艾宁, 陈健. 温室气体 CO₂ 的捕集和分离技术面临的挑战与机遇 [J]. *化工进展*, 2005, 24(1): 1 – 4.
Fei Weiyang, Ai Ning, Chen Jian. Challenge and opportunity of CO₂ capture and storage [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*. 2005, 24(1): 1 – 4. (in Chinese)
- [5] 李天成, 冯霞, 李鑫钢. 二氧化碳处理技术现状及其发展趋势 [J]. *化学工业与工程*, 2002, 19(2): 191 – 196.
Li Tiancheng, Feng Xia, Li Xingang. The current status and the developing trends of carbon dioxide treating technologies [J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2002, 19(2): 191 – 196. (in Chinese)
- [6] Rubin E S, Chao Chen, Rao A B. Cost and performance of fossil fuel power plants with CO₂ capture and storage [J]. *Energy Policy*, 2007, (35): 4444 – 4454.
- [7] Giger F, Di Zanno P. Making carbon capture and storage happen in Europe: Markets, policy and regulation [R]. Brussels: EU Technology Platform ZEFFPP, 2006, 9.
- [8] Willede A. Needs for R&D: The view of European utilities [R]. Brussels: TP Advisory Council, 2005, 6.
- [9] Mocilnikar A T. Climate change, energy and sustainable development: How to tame King Coal? [R]. Paris: Coal Working Group of the Délégué Interministériel au Développement Durable, 2006, 3.
- [10] de Best-Waldhober M, Daamen D. Public perceptions and preferences regarding large scale implementation of six CO₂ capture and storage technologies [R]. Leiden: Centre for Energy and Environmental Studies, Leiden University, 2006, 3.
- [11] Directorate-General for Research, European Commission. Attitudes towards energy [R]. Barcelona: Universitat Pompeu Fabra, 2006, 1.
- [12] Reiner D M, Curry T E, de Figueiredo M A, et al. American exceptionalism? Similarities and differences in national atti-

- tudes toward energy policy and global warming [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(7): 2093–2098.
- [13] Shackley S, McLachlan C, Gough C. The public perception of carbon dioxide capture and storage in the UK: Results from focus groups and a survey [J]. *Climate Policy*, 2004, 4(4): 377–398.
- [14] Akimoto K, Takagi M, Tomoda T. Economic evaluation of the geological storage of CO₂ considering the scale of economy [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1(2): 271–279.
- [15] Odeh N A, Cockerill T T. Life cycle analysis of UK coal fired power plants [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49: 212–220.
- [16] Mace M J, Hendriks C, Coenraad R. Regulatory challenges to the implementation of carbon capture and geological storage within the European Union under EU and international law [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1(2): 253–260.
- [17] Gibbins J, Chalmers H. Preparing for global rollout: A ‘developed country first’ demonstration programme for rapid CCS deployment [J]. *Energy Policy*, 2008, 36: 501–507.
- [18] Blytha W, Bradley R, Bunne D, et al. Investment risks under uncertain climate change policy [J]. *Energy Policy*, 2007, 35: 5766–5773.
- [19] Smekens K, van der Zwaan B. Atmospheric and geological CO₂ damage costs in energy scenarios [J]. *Environmental Science & Policy*, 2006, 9(3): 217–227.
- [20] 王晓晴, 唐加福, 宫俊. 基于分散搜索的多目标动态单元构建方法 [J]. *管理科学学报*, 2009, 12(5): 45–52.
Wang Xiaoqing, Tang Jiafu, Gong Jun. Multi-objective dynamic cell formation approach based on scatter search [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2009, 12(5): 45–52. (in Chinese)
- [21] 曾嵘, 魏一鸣, 范英, 等. 人口、资源、环境与经济协调发展系统分析 [J]. *系统工程理论与实践*, 2000, 12: 1–6.
Zeng Rong, Wei Yiming, Fan Ying, et al. System analysis of harmonization development among population, resource, environment and economy [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2000, 12: 1–6. (in Chinese)
- [22] 魏一鸣, 吴刚, 刘兰翠, 等. 能源—经济—环境复杂系统建模与应用进展 [J]. *管理学报*, 2005, 2(2): 159–170.
Wei Yiming, Wu Gang, Liu Lancui, et al. Progress in modeling for energy-economy-environment complex system and its applications [J]. *Chinese Journal of Management*, 2005, 2(2): 159–170. (in Chinese)
- [23] 金菊良, 魏一鸣. 复杂系统广义智能评价方法与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 53–70.
Jin Juliang, Wei Yiming. *Generalized Intelligent Assessment Methods for Complex Systems and Application* [M]. Beijing: Science Press, 2008: 53–70. (in Chinese)
- [24] 于渤, 黎永亮, 迟春洁. 考虑能源耗竭, 污染治理的经济可持续增长内生模型 [J]. *管理科学学报*, 2006, 9(4): 12–17.
Yu Bo, Li Yongliang, Chi Chunjie. Endogenous model with exhaustible energy, pollution abatement spending and sustainable growth induced [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2006, 9(4): 12–17. (in Chinese)
- [25] 许士春, 何正霞, 魏晓平. 资源消耗、污染控制下经济可持续最优增长路径 [J]. *管理科学学报*, 2010, 13(1): 20–30.
Xu Shichun, He Zhengxia, Wei Xiaoping. Sustainable optimal economic growth path under resource consumption and pollution control [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2010, 13(1): 20–30. (in Chinese)
- [26] 田立新, 等. 能源经济系统分析 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2005: 27–47.
Tian Lixin, et al. *Analysis of Energy Economical System* [M]. Beijing: Social Science Academic Press, 2005: 27–47. (in Chinese)
- [27] van Alphen K, Voorst Q V, Hekkert M P, et al. Societal acceptance of carbon capture and storage technologies [J]. *Energy Policy*, 2007, 35(8): 4368–4380.
- [28] Shackley S, Waterman H, Godfroy P, et al. Stakeholder perceptions of CO₂ capture and storage in Europe: Results from a survey [J]. *Energy Policy*, 2007, 35(10): 5091–5108.
- [29] 邵帅, 齐中英. 资源输出型地区的技术创新与经济增长——对“资源诅咒”现象的解释 [J]. *管理科学学报*, 2009, 12(6): 23–33.

- Shao Shuai, Qi Zhongying. Technological innovation and economic growth in resource-oriented regions: An alternative interpretation of "resource curse" phenomenon [J]. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(6): 23 – 33. (in Chinese)
- [30] 孙晓华, 原毅军. 产业集聚效应的系统动力学模型研究 [J]. 经济与管理, 2007, 27(5): 13 – 16.
Sun Xiaohua, Yuan Yijun. Analysis on industrial agglomeration effect based on the system dynamics mode [J]. Economy and Management, 2007, 27(5): 13 – 16. (in Chinese)
- [31] 李 丽. 区域循环经济系统的动力学仿真研究 [D]. 成都: 四川大学, 2007: 13 – 14.
Li Li. Modeling and Simulation of System Dynamics Model with Multi-objective Programming for Region Circular Economy [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007: 13 – 14. (in Chinese)
- [32] 叶 泽, 张新华, 曹永泉. 考虑价格上限的发电容量投资模型与分析 [J]. 管理科学学报, 2009, 12(5): 53 – 60.
Ye Ze, Zhang Xinhua, Cao Yongquan. Electricity generation capacity investment model and policy analysis in consideration of price caps [J]. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(5): 53 – 60. (in Chinese)
- [33] de Coninck H. Trojan horse or horn of plenty? Reflections on allowing CCS in the CDM [J]. Energy Policy, 2008, 36(3): 929 – 936.
- [34] ZAKKOUR P. CCS in the EU ETS: The Role of Carbon Capture and Storage in the Carbon Market [C]. IETA Side Event, COP/MOP, Montreal, 2005, 12.

The research on the model and stability of CCS based on the system dynamics

LIANG Da-peng, XU Chun-lin, MA Dong-hai

School of Management and Economics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract: On the basis of analyzing the carbon dioxide value chain, this paper designs a CCS commercial operation system. The system considers the power plant as the capture part and designs an independent transport and storage part to achieve the value exchange of carbon dioxide. According to the general equilibrium model (GEM), there would be positive or negative feedback loops among these members. With the method of system dynamics, this paper constructs the flow graph of CCS commercial operation system and the simulation proves the possibility that there would be a stable state for the system. Some key factors would be found according the dynamic analysis of the system. Simulation results show that, ratio of capture and government subsidy are sensitive factors for CCS industrial system, which means deployment of CCS depends not only on policy support but also on enterprise participation.

Key words: CCS; system dynamics; sensitive analysis