

文章编号:1671-4229(2023)01-0033-12

# 基于投入产出分析的再生产循环动力学建模与解析

刘 广<sup>1</sup>, 柯凡尘<sup>1</sup>, 肖任虹<sup>2\*</sup>

(1. 广州大学 经济与统计学院, 广东 广州 510006; 2. 云南财经大学 国际工商学院, 云南 昆明 650221)

**摘要:** 中国经济已迈入以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展阶段。传统的投入产出分析虽然能够较好地反映生产网络的中间结构,但较难充分揭示价值流循环。基于马克思再生产理论与循环经济以及能源经济在体系构建思想上的一致性,借鉴生物物理建模方法构建宏观经济再生产循环动力学模型,并对其模拟解析。结果发现,在经济发展初期,可以通过大量的资源消耗取得较快发展速度;随着资源约束增强,经济发展速度逐渐放缓。结论较好地揭示了经济发展路径,为马克思经济增长理论提供了一个模型示例,并为双循环战略提供了一个注解和指引。

**关键词:** 再生产; 投入产出分析; 循环经济; 马克思经济增长理论

中图分类号: F 061.1 文献标志码: A

## Modeling and analyzing on the dynamics of reproduction cycle based on input-output method

LIU Guang<sup>1</sup>, KE Fan-chen<sup>1</sup>, XIAO Ren-hong<sup>2\*</sup>

(1. School of Economics and Statistics, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. International Business School, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China)

**Abstract:** China's economy has entered a new development stage of "dual circulation", the domestic cycle is the main body and the domestic and international cycles promote each other. Although traditional input-output analysis can well reflect the intermediate output structure of a production network, it is difficult to fully reveal the value stream cycle. Based on the consistency of Marxism reproduction system, circular economy and energy economy in theoretical construction, we use the biophysical modeling method to construct the macro-economic reproduction cycle model, and carry out the simulation analysis. The results show that in the early stage of economic development, rapid development can be achieved through a large amount of resource consumption. As resource constraints increase, economic growth slows down. The conclusions reveal the economic development path, provide a sample model for the Marxism economic growth theory, and a guidance for the "dual circulation" strategy.

**Key words:** reproduction; input-output analysis; circular economy; Marx's economic growth theory

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-09-05

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(19BJY249)

作者简介: 刘广(1980—),男,讲师,博士. E-mail:mrliguang@126.com

\*通信作者. E-mail:xiaorenhong2001@163.com

引文格式: 刘广,柯凡尘,肖任虹. 基于投入产出分析的再生产循环动力学建模与解析[J]. 广州大学学报(自然科学版),2023,22

(1):33-44.

在大国博弈升级、新冠肺炎疫情冲击以及地缘冲突加剧等背景下,全球生产网络和供应链系统面临着全部或部分中断风险。为积极应对复杂变幻的国内外形势,中央于2020年初及时实施“以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进”的重大战略部署,旨在改变全球经济过往由个别国家主导的单一循环模式,扭转我国长期处于产业链低端的发展格局,推动国内经济发展模式由代工到研发、由模仿到创新和由“制造”到“智造”的历史性转变。为此,双循环战略的理论基础和实施路径值得深入探究。

Leontief提出的投入产出分析较多借鉴了马克思社会再生产理论,并与之具有较强的内在相似性。在一定程度上,其后经济学领域产生的基于投入产出分析的诸多成果,与二者存在理论上的一致性不无关系<sup>[1]</sup>。投入产出分析不仅在宏观经济部类分析中具有广泛应用价值和指导意义,而且在循环经济、能源经济以及生物或物理学科中也有广泛运用,形成了跨学科综合运用现象。基于此,本文尝试借助再生产循环图式,以宏观投入产出为对象,借鉴生物物理建模方法,构建一个基于马克思再生产理论的循环经济投入产出动力学模型,并对其数值分析和仿真,为双循环战略的投入产出结构提供一个基于模型仿真的测度和评价方法。

## 1 文献综述与理论分析

### 1.1 再生产理论的循环图式

在马克思再生产理论中,生产力由劳动者、劳动资料和劳动对象三要素构成。劳动者是具有一定生产能力、劳动技能和生产经验,并且参与到社会生产活动中的人,直接作用于劳动对象。劳动资料与生产工具的概念有一定交汇,即生产工具作为劳动资料的一个外延概念,在生产过程中直接对劳动对象进行加工<sup>[2]</sup>。在唯物辩证法下,这种概念交汇体现的是认识论与本体论的辩证统一:生产工具中滞留着一类劳动者特征,凝结了一类抽象劳动;生产工具若要实现特定用途,在使用时必须同步提取其中承载的抽象劳动信息。正因如此,生产活动极大地依赖劳动者的经验、能力及技能,比如即便简单的挑选生产资料活动,也同时包含了辨认、抓取和归类等多种技能。

从生产工具概念中分离出劳动者特征滞留的部分,看起来似乎多此一举且比较牵强,但却有极强的认知论价值。人类无时无刻不在对生产工具的使用和制造作

出激励反馈。某类特定生产工具被生产出来后,它就成为经历过或简单或复杂的筛选过程的劳动资料,其中已经蕴涵了过往的抽象劳动;若进一步对其构成要素进行有目的地排列,则过往抽象劳动更加凸显。将物质性的生产工具在概念上进行更一般推广,可以使非实体性的劳动手段也被纳入劳动资料概念范畴中。劳动手段不需要必然成为实际的、改造劳动对象的、作为物件的物质性工具,只是成为生产工具的图式,就能够连接某种劳动活动与劳动对象的关系。如果将生产系统比喻为计算机,则生产工具类似于计算机硬件,劳动手段类似于计算机软件。软件对硬件的整合——非实体性的劳动手段对劳动工具的运作,才导致计算机的复杂程度高于各个硬件复杂程度之和。软件之于硬件的主体间性是计算机这一类“ $1+1>2$ ”的复杂生产工具产生的关键因素。

综上所述,生产活动都基于以往劳动者的生产实践,使用劳动资料就是在过去劳动者的间接指导下进行生产。更进一步,生产关系概念提出后,劳动者与劳动资料出现概念上的分离。比如任何人作为自给自足的个体时,既会与自己发生生产关系,也会与自己发生消费关系。这种描述是准确的,但将两种现象放在一个分析对象上,会导致现象与其发生过程停留在形式上,而无法对结构进行分析,也难以发现本质的运动规律。斯宾诺莎认为,实体是自然意义上不发生运动变化的本体论整体,所以是“形而上学地改了装的、脱离人的自然”。由于在本体论上受到这一制约,因此,其二重性无法实在地展现<sup>[3-4]</sup>。需要跳出斯宾诺莎“僵死的本体论”,在主体间的运动中把握实践的本体。

黑格尔认为,我们无法言说何为绝对的物,物质的真理性只能靠自己显现,显现出来的就是属性<sup>[5]</sup>。物质属性的展示过程是绝对的形式,而属性显现本身是作为单纯方式式样的规定。如果不希望分析对象与自己发生关系,只需要让马克思再生产理论体系下的“人”同时扮演两个身份:在进行生产活动时,是作为生产者;进行消费活动时,是作为消费者。这种描述意味着一个“人”在进行其中一个特定活动时,可以暂时代表进行这一活动的群体。马克思没有从客体的视角或以直观感受的态度去理解对象、现实、感性,而是从实践、主体、认识的视野去把握它们——就是在自我相关性的视域内去把握对象、现实和感性。“当物按人的方式同人发生关系时,人才能在实践上按人的方式同物发生关系。”<sup>[3]</sup>这种身份认同好比将人置于一个黑暗房间,只有在进行与这

个房间有关的活动时,他才通过各种方式把这个房间作为实践对象,才会强调自己在这个房间中。此时,他会以一种“在房间里的人”的身份,通过广义的传播媒介将这个房间的内容向房间外的他人进行转述。如果这个房间里同时有两类工具,比如修理工具和厨具,房间里的人会依据自己正在做的事情对这个房间进行定义:在这个房间里修理东西时,将其定义为工具房;在这个房间里烹饪时,将其定义为厨房。尽管这“两个房间”是同一个房间,但此时分析法比归纳法更有效。

可见,当身份隐喻进入到分析话语中,就能暂时摆脱归纳法对个人不可分的束缚,分析“作为生产者的人”与“作为消费者的人”——同一个人的两种身份——的相互关系。

在自给自足的生产体系中,作为生产者的人通过劳动创造价值,将抽象劳动凝结到产品中;作为消费者的人通过消费,将凝结在产品中的抽象劳动摄入,转化后

投入再生产中。如果蕴含在产品中的抽象劳动刚好够消费者再生产同样多的抽象劳动,此时没有剩余产出 (surplus product);若生产力得到发展,等量的抽象劳动能够生产更多产品,于是出现剩余产出,相应出现再生产循环(图 1)。

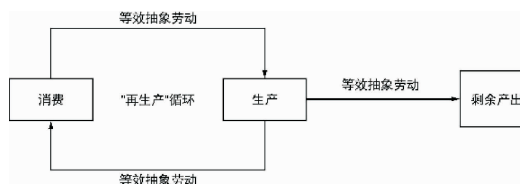


图 1 具有剩余产出的再生产循环

Fig. 1 Reproduction circulation with surplus output

当出现剩余产出时,商品交换也随之出现。用 <1> 和 <2> 区分两个可以生产剩余产出的主体,于是再生产循环过程就包含剩余产出过程及其对应的消费过程(图 2)。

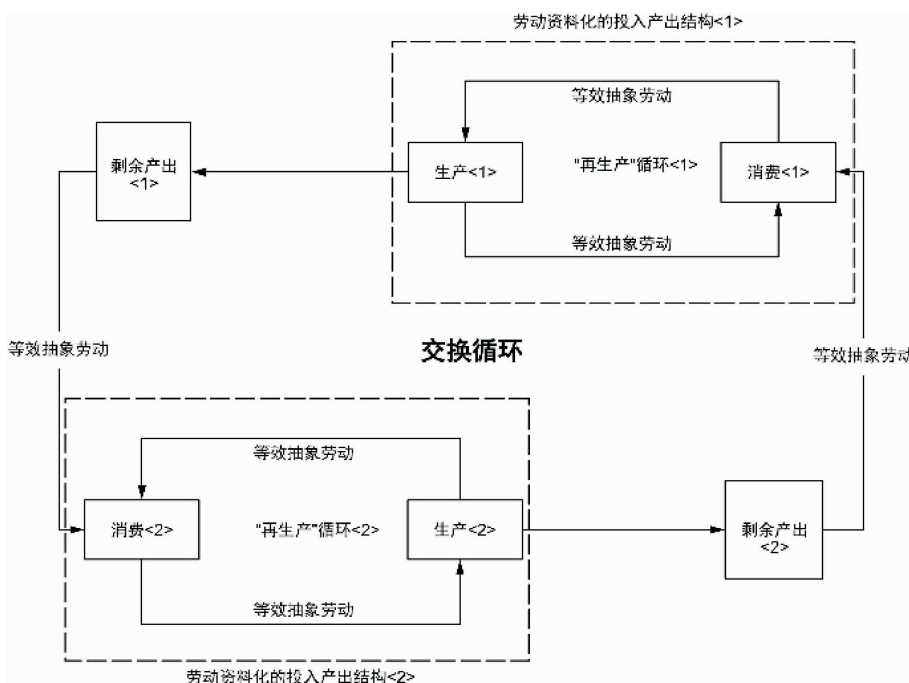


图 2 再生产循环过程

Fig. 2 Reproduction circulation process

在全局优化目标下,交换的目标既是实现资源优化配置,也是对劳动分工做出的结构优化实践。商品市场由一群对价值看法不同而对价格看法相同的人们所组成。当市场中只有两个交易主体时,价格可看成是商品交换的数量比。交易双方倾向于将边际效用较低的商品用于交换,确保各自生产效率与劳动资料得到更好的匹配,尽量获得更大效用。因此,交易价格可看成是指

导交易双方达到总效用最大化的目标函数。

在既有研究基础上,若直接对再生产循环的理论模型进行定量研究,容易陷入对象不明确的困境中。但是,如果能将该模型具体到一个相对熟悉的领域,则可以尝试通过借鉴该领域的研究对象及其关系建模。考虑这样一个经济系统,其中各主体的剩余产出无法提高自己的生产效率,即剩余产出在任何尺度下对自己的效

用值都为零,而对交易对手的效用值是任一常数。这将导致对任何一方而言,交换价格都趋向于零。现实中,与之对应的实例是废弃物的循环再利用。马克思在《资本论》手稿中有相关阐述:“在制造机车时,每天都有成车皮的铁屑剩下。机车制造厂把铁屑收集起来,再卖给(或赊给)那个向机车制造厂提供主要原料的制铁厂。制铁厂把这些铁屑重新制成块状,即意味着对这些铁屑投入新的劳动。当铁屑以这种形式回到机车制造厂时,这些铁屑便成为产品价值中补偿原料的部分。就这样,这些铁屑往返于这两个工厂之间——当然,不会是等量的铁屑,但总是含有一定量的铁屑。”<sup>[6]</sup>本质上,这种使用废弃物作为生产资源在不同生产部门之间循环的过程,是一种通过对原料消耗的损失价值进行减量,以追求利润最大化的生产实践过程。这促使聚焦废物循环利用的循环经济研究被纳入到再生产循环的特殊化研究范围里。

## 1.2 循环经济及其投入产出结构

### 1.2.1 循环经济研究的困境

循环经济概念最早由英国环境经济学家 Pearce 和 Turner 提出<sup>[7]</sup>。在最初的概念设想中,循环经济主要围绕经济体系中资源供应商、废物同化者和效用来源这 3 个基本要素展开讨论。循环经济理念主张周期性地利用资源,来创造、供应和使用产出,以供企业进行生产活动。

自 20 世纪 60 年代以来,循环经济研究蓬勃发展,取得了丰富成果。物质流分析是循环经济研究的主流方法,最能体现其概念内核。其后, Kandelaars<sup>[8]</sup>将物质和生产相结合,提出了物质生产链概念,并在此基础上提出了一些具体应用模型,如静态规划模型(SP)、动态模拟模型(DS)及一般均衡模型(CGE)等; Mathijs 等<sup>[9]</sup>基于物质流路径提出了物质流分析(SFA)、生命周期评价(LCA)和经济平衡分析(EEA)3 种方法; Pittel 等<sup>[10]</sup>进一步将物质平衡引入宏观动态研究框架。这些模型指出,当废弃物可以被资源化时,废物库存也是企业的利润源泉之一,企业受到激励,会对废弃物进行再利用和再循环。

借助 Leontief 等<sup>[11-12]</sup>提出的环境保护投入产出分析模型, Nakamura 等<sup>[13-14]</sup>提出了垃圾投入产出模型(WIO)。Londero<sup>[15]</sup>基于产品工艺假设,提出了产品二次制造和副产品的处理方法,以尝试解决废弃物的可再利用问题。作为垃圾治理的研究工具,WIO 非常有效,其中提出的副产品处理方法也为循环经济提供了可借鉴的实践方法。

虽然投入产出分析已被国内学者引入到可持续发展及循环经济研究中,但起步较晚,研究还不够深入。在尚未赶上国际循环经济研究浪潮的情况下,国内研究已面临方向上的“破碎困境”<sup>[16]</sup>。

### 1.2.2 能源经济研究中的投入产出分析

投入产出分析在国内外能源经济领域研究中也有相当成熟的应用。张智光<sup>[17]</sup>通过对超循环经济理论的研究,提出循环经济不仅有工业生态学分支,还可以向更加深广的生态经济自组织理论方向拓展。王军<sup>[18]</sup>以社会投入产出表数据为基础编制了我国社会核算矩阵 SAM 表,并建构能源经济 CGE 模型对 SAM 表进行研究。能源投入产出分析研究承接了循环经济投入产出研究范式,为再生产循环的数理推导和实证提供了指导性很强的建模思路。

能源和经济系统之间的相互作用效果可以用能源投资回报指标(Energy Returned on Energy Invested, EROEI)来描述。经验研究表明,EROEI 与能源价格之间存在反比关系,与经济健康之间存在正向关系。Hall 等<sup>[19]</sup>认为,在能源短缺时期,可自由支配支出通常会下降。Heun 等<sup>[20]</sup>认为,尽管 EROEI 和能源价格的某些关系已经通过显著性检验,但随着 EROEI 变小,这些显著关系可能会破裂。Hamilton<sup>[21]</sup>与 Rubin<sup>[22]</sup>利用实证分析指出,2000 - 2007 年能源价格上涨和 EROEI 下降是 2008 年金融危机的诱因之一。

源于 Forrester<sup>[23]</sup>在工业动力学方面的开创性工作,World 3 模型是较早隐含 EROEI 的动力学模型<sup>[24]</sup>。在技术上,World 3 模型可以被描述为一个全球聚合的系统动力学框架。继 World 3 模型之后,Nail<sup>[25]</sup>开发了 5 个模型:COAL1 代和 2 代模型,FOSSIL1 代和 2 代模型,以及 IDEAS 模型。从技术角度看,COAL1 代模型更新迭代的路径类似于 World 3 模型的聚合建模方法(“top-down”的建模思想);FOSSIL2 代模型的更新迭代强调了初级能源生产的更多细节(“bottom-up”的建模思想)。IDEAS 与 FOSSIL2 代的建模思想相仿,特点是模型中每个部门及其子部门都有单独的行为方程<sup>[26]</sup>。

继 World 3 和 COAL-FOSSIL 的研究之后,Hou-nam<sup>[27]</sup>基于 STER(System, Time, Energy, Resources)模型提出了一个创新的 EROEI-Dynamic 方法。STER 是最早描述资源枯竭时期能源部门行为的模型之一,也是最早直接关注 EROEI 动态的模型之一(图 3)。STER 模型假设能源资源枯竭约束将导致一次能源部门对资源需求增加,并基于此模拟能源效率指数。该模型通过基于能

源的最大经济潜力来确定资本流动和生产,减少了参数的不确定性。

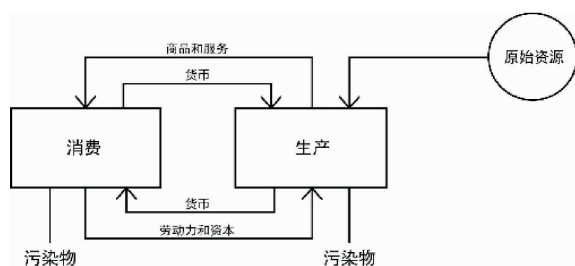


图 3 STER 模型

Fig. 3 Model of STER

STER 模型在结构上与再生产循环模型相似,其使用 EROEI 指标,在本质上属于再生产循环的一个特殊化研究,故与投入产出模型在技术上也基本一致。由此可知,投入产出分析可成为再生产循环定量分析的工具之一。国内已有学者在社会再生产研究中将投入产出分析作为经济增长结构的描述方法,基于两大部类转换关系进行论述,形成了诸多建设性成果,为再生产理论的数理化建模和实证研究做出了卓越贡献。

### 1.3 扩大再生产的投入产出模型研究

在经济史上,马克思第一个科学和系统地发展了经济增长理论,其在深入批判和继承古典经济学相关理论的过程中,也逐步形成和发展了社会再生产理论的科学体系<sup>[28]</sup>。国内学者早在 20 世纪 50 年代开始就应用马克思再生产理论研究经济增长问题<sup>[29-31]</sup>。

王艺明等<sup>[32]</sup>通过文献梳理总结了国内学者对马克思经济增长理论研究的 3 个路径:①通过理论和实证研究进一步发展马克思经济增长理论;②建立马克思主义内生性增长理论;③建立马克思主义动态经济增长理论。其中,基于投入产出模型的一般均衡分析贯穿马克思经济增长理论研究始终。赵峰等<sup>[33]</sup>利用中国 2000 - 2010 年的投入产出表数据构建了一个宏观经济两部类模型,对其中的生产资料部类与消费资料部类结构、收入分配结构和总需求结构及其与资本工资率、利润工资率、利润率的动态关系进行了经验分析。赵峰等<sup>[34]</sup>构建了一个从投入产出表到马克思两大部类表的映射模型,并使用 2002 年、2007 年和 2012 年中国省级投入产出表考察了区域经济结构的基本特征、地区差异和演化逻辑。苏立君等<sup>[35]</sup>基于马克思政治经济学对生产性与非生产性劳动的区分、资本积累理论及假设退出模型 (HEM),使用世界投入产出数据及中美 2018 - 2019 年双边贸易数据,分析了逆全球化思潮产生的逻辑,评估

了中国经济面临的逆全球化风险。

另有一些研究从复杂劳动还原和转化的角度探讨马克思主义内生性增长理论。孟捷等<sup>[36]</sup>立足于两种社会必要劳动概念,将希法亭和鲁宾提出的两种传统理论适当修正后综合在一个框架里,据此设计了一个可以求解复杂劳动还原系数的投入产出模型。苏立君等<sup>[37]</sup>认为技能形成过程与商品生产过程中投入的劳动性质不同,是两个独立过程,并据此修正了 Okisio<sup>[38]</sup>基于投入产出分析建立的复杂劳动还原模型。

此外,也有研究借鉴新古典经济学的偏好设定,通过引入生产函数建立马克思主义动态经济增长理论。李海明等<sup>[39]</sup>从扩大再生产的实现条件出发,将资本积累引入资本家偏好,使用动态最优方法重新构建马克思扩大再生产理论,讨论了实现稳定增长的基本参数条件。徐春华<sup>[40]</sup>在马克思两部类模型框架下探讨生产资料部类的资本有机构成提高对本部类优先增长的理论逻辑,并通过相应的计量模型检验发现,第 I 部类资本有机构成的提高无论是在理论逻辑还是在实证检验方面都会对第 II 部类的增长率产生负向作用。李帮喜等<sup>[41]</sup>在“马克思—斯拉法”三部类再生产模型框架下,利用我国 1987 - 2015 年的投入产出表刻画了投资驱动型增长下收入分配与宏观效率之间的关系。

投入产出表的设计理念与马克思再生产理论体系在构建思想上较为相似,故对后者的经验研究多基于投入产出分析开展<sup>[1]</sup>。在能源经济模型构建中,跨学科地运用了生物物理方法,也为投入产出模型的拓展做出了重大贡献。基于马克思政治经济学与能源经济在理论构建思想上的一致性,本文试图以宏观投入产出为对象,借鉴生物物理建模方法,构建地区再生产的投入产出动力学模型。

## 2 模型构建与推导

在微分方程建模中,一般都是通过描述研究对象的变化特征及变量变化率之间的关系来确定模型函数。本文同样采用微分方程对资源最优配置问题进行建模。假设在封闭经济体中,一个变量的存量变化率等于输入量变化率减去输出量变化率。基于有限资源约束,生产者与消费者需要协商资源配置。消费者追求消费效用最大化,生产者追求产出最大化,二者之间可能存在冲突或矛盾。生产者在短期内获得最大产出,并不需要占用消费者资源,因为消费带来的劳动时间可以在原材料

的投入落入陷阱时提供新的产出增长,故消费者占用的资源对生产者而言并非竞争的,不会因为期限改变而导致目标不一致。消费者的目标会因为期限不同存在差异,如果只考虑短期,消费者愿意消费所有资源,而不进行任何生产;若考虑长期,在边际效应递减规律作用下,消费的即期效用落入陷阱,此时投资远期回报的折现要大于即期消费回报,故消费者会选择让出资源,最终与产出最大化的目标一致。据此可通过“消费即燃烧”设置燃烧参数,基于产出最大化目标,建立投入产出结构的再生产动力学模型。

### 2.1 变量及参数说明

使用的相关变量如下: $t$  代表循环时间,  $t \geq 0$ ;  $UF$  (Unlit Fuel) 代表未燃烧的燃料数量,  $UF \geq 0$ ;  $BF$  (Burning Fuel) 代表处于燃烧状态的燃料数量,  $BF \geq 0$ ;  $RM$  (Raw Materials) 代表原材料总数量,  $RM \geq 0$ ;  $PQ$  (Product Quantity) 代表产品数量,  $PQ \geq 0$ ;  $RC$  (Resource Constraint) 代表资源约束数量。

各状态下标中,  $save$  表示留存量,  $in$  表示投入量,  $out$  表示产出量。

各自然常量参数中,  $Mm$  表示单个“燃料”的质量, 设定半径为  $100 \mu\text{m}$  的碳粒, 质量为  $3.6 \times 10^{-6} \text{ kg}$ ;  $IT$  (Ignition Temperature) 表示着火温度, 设定为  $696 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $C_p$  表示碳粒的恒压比热容, 设定为  $840 \text{ J}/(\text{kg} \times \text{ }^\circ\text{C})$ ;  $FCV$  表示燃料热值(选用低位发热量), 设定为  $21.26 \times 10^6 \text{ J}/\text{kg}$ ;  $SA$  表示二次风每秒送风量, 设定为  $317.08 \text{ kg}/\text{s}$ ;  $C_{p-air}$  表示氧气的恒容比热容, 设定为  $773 \text{ J}/(\text{kg} \times \text{ }^\circ\text{C})$ ;  $\tau_e$  表示单个燃料标准燃尽时间, 设定为  $0.02 \text{ s}$ ;  $\bar{\tau}$  表示修正的燃料燃尽时间;  $ROI$  (Return on Investment) 表示投入产出比, 无量纲, 设定为  $1.5$ 。

各指标参数中,  $TE$  (Transfer Efficiency) 表示能量传递效率, 即废弃物在自然界再度资源化的效率, 生产视角下亦可以表述为资源浪费率;  $C$  表示资源在生产中用于燃料与用于原材料的比例,  $C = UF_{use}/RM_{use}$ ;  $SEC$  表示单位 GDP 消耗的单位标准煤, 单位为  $\text{kg}/\text{万元}$ ;  $MVC$  表示边际可变成本, 等于单位投资除以单位标准煤, 单位为  $\text{万元}/\text{kg}$ 。

### 2.2 模型推导及含义描述

笔者构建的宏观经济再生产模型基于生产和消费两个模块。考虑到二者都有输入输出流, 模型应至少有 4 个变量; 再考虑到环境资源总量约束, 则模型总共有 5 个方程。考虑各自的输入输出, 在非负约束下对模型求规划最优解。模型构建过程如下。

#### 2.2.1 总资源消耗方程

笔者着重关注经济循环过程, 暂时只考虑资源消耗过程, 而未将废弃物的资源化过程纳入模型中。这种建模思路与国民经济核算理念相似, 都是基于特定时段内中间产品与最终产品抽象劳动流动的核算。总资源消耗方程见式(1)。

$$\frac{dRC_{save}}{dt} = \frac{dRC_{in}}{dt} - \frac{dRC_{out}}{dt} = \frac{dPQ_{raising}}{dt} - \frac{dRC_{out}}{dt} \quad (1)$$

总资源  $RC$  的留存量取决于产品产出量、燃料投入量与原材料投入量, 因此, 总资源输出方程可表示为

$$\frac{dRC_{out}}{dt} = RC_{save} \cdot TE + \frac{dUF_{in}}{dt} + \frac{dRM_{in}}{dt} \quad (2)$$

原材料输入项与燃料输入项共同构成了总资源的资源配置机制, 在模型构建上参考生态学中阻滞增长的两种群竞争模型(Lotka-Volterra 模型)。若认为原材料和燃料是两个争夺总资源的种群, 其最大容量都是总资源  $RC_{save}$ , 二者对总资源的占用效果是等价的, 不存在多倍关系。若考虑对固有增长率基于输入量在输出量作用下的残留修正为动态增长率: 原材料和燃料的残留速率分别为  $\frac{UF_{save} - UF_{out}}{UF_{save}}$  和  $\frac{RM_{save} - RM_{out}}{RM_{save}}$ , 残留速率过高意味着过多的输入未被消化, 故残留速率应负反馈于增长率。

燃料占用资源约束量  $RC_{save}$  中的  $UF_{save}$  份, 剩余可占用的资源约束量为  $RC_{save} - UF_{save}$ 。进一步考虑, 原材料占用资源约束量  $RC_{save}$  中的  $RM_{save}$  份, 燃料剩余可占用的资源约束量修正为  $RC_{save} - UF_{save} - RM_{save}$ 。于是得到有燃料输入的阻滞增长模型和原材料输入的阻滞增长模型, 见式(3)和式(4)。

$$\frac{dUF_{in}}{dt} = \frac{UF_{out}}{UF_{save}} \cdot UF_{save} \cdot \frac{RC_{save} - UF_{save} - RM_{save}}{RC_{save}} \quad (3)$$

$$\frac{dRM_{in}}{dt} = \frac{RM_{out}}{RM_{save}} \cdot RM_{save} \cdot \frac{RC_{save} - RM_{save} - UF_{save}}{RC_{save}} \quad (4)$$

总资源消耗方程输出项就是将式(3)与式(4)加总, 以体现生产活动对现有消费资料关于第一部类和第二部类的资源配置。

#### 2.2.2 燃料剩余方程

在热力学中, 焓是表征物质系统能量的重要状态参数, 等于内能与压强和体积的乘积之和, 常用符号  $H$  表示。焓的变化 ( $\Delta H$ ) 等于系统所吸收或释放的热量, 可以理解为整体的能量变化量。焓变的单位是  $\text{kJ}/\text{mol}$ , 吸热时,  $\Delta H > 0$ ; 放热时,  $\Delta H < 0$ 。

熵是一个反映自发过程不可逆性的物质状态参数,

用符号  $S$  表示。热力学第二定律指出,在孤立体系中发生的任何变化,总是向着熵增的方向进行,即  $\Delta S_{isolated} > 0$ 。

吉布斯自由能指的是在某一个热力学过程中,系统减少的内能中可以转化为对外做功的部分,常用符号  $G$  表示。 $G$  的改变量  $\Delta G = (G_2 - G_1) \leq$  非体积功  $W_{non-volume}$ , 代表体系在等温等压下做非体积功  $W_{non-volume}$  的能力。反应过程中  $G$  的减少量  $-\Delta G$  是体系做非体积功的最大限度。反应进行的方向和方式可以由  $\Delta G$  进行判断:  $-\Delta G > W_{non-volume}$ , 反应以不可逆方式自发进行;  $-\Delta G = W_{non-volume}$ , 反应以可逆方式进行;  $-\Delta G < W_{non-volume}$ , 不能进行。若反应在等温等压下进行,不做非体积功,即  $W_{non-volume} = 0$ , 则  $\Delta G < 0$ , 自发进行;  $\Delta G = 0$ , 不能进行;  $\Delta G > 0$ , 逆反应自发进行。

普通化学理论通过焓变与熵变的概念,描述化学平衡下化学反应的属性,进而作为状态函数的吉布斯自由能  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$  成为描述化学反应发生状态的重要参量。焓变与熵变在数值上的对立使得吉布斯自由能对化学反应式的发生有了多种形式。

观察燃烧现象,未燃烧的燃料与助燃剂之中蕴含着燃烧反应的吉布斯自由能,而燃烧反应就是一个自发的放热反应,本质可以概括为“能-功”转换。观察消费现象,产品之中凝结着抽象劳动,产品的生产过程本质就是“降熵增焓”的过程。这意味着消费过程的作用就是让产品中的抽象劳动在“熵增焓减”的过程中得到释放,使抽象劳动进入再生产循环中,获得蕴含在抽象劳动中的生产能力,进而依然可以概括为“能-功”转换。消费与燃烧二者在化学语境下的一致性使得“消费即燃烧”的隐喻得以成立,故借鉴燃烧学领域中的碳粒燃烧模型,描述蕴含在消费品内单位抽象劳动的消费过程,见式(5)。

$$\frac{dUF_{save}}{dt} = \frac{dUF_{in}}{dt} - \frac{dUF_{out}}{dt} \quad (5)$$

其中,燃料输入项  $\frac{dUF_{in}}{dt}$  可通过资源分配方程确定,燃料输出项  $\frac{dUF_{out}}{dt} = \frac{dBF_{in}}{dt}$ , 即等于下文设计的燃烧态燃料输入项。

### 2.2.3 燃烧态燃料剩余方程

燃烧态燃料剩余方程见式(6)。

$$\frac{dBF_{save}}{dt} = \frac{dBF_{in}}{dt} - \frac{dBF_{out}}{dt} \quad (6)$$

(1) 燃料着火项  $\frac{dBF_{in}}{dt}$

因为  $\frac{dBF_{in}}{dt} = \frac{dUF_{out}}{dt}$ , 故基于投入产出建模有

$$\frac{dBF_{in}}{dt} = f(UF_{save}, BF_{save}) = UF_{save} \times k \times p \quad (7)$$

式(7)中  $p = \frac{UF_{save} \times BF_{save}}{(UF_{save} + BF_{save})^2}$  为燃烧状态的燃料与

未燃烧燃料结合的概率。其中,  $BF_{save}$  为燃烧状态的燃料数量,  $UF_{save}$  为未燃烧的燃料数量。一次结合的概率相当于抽样中一次抽取的概率,不考虑第二次抽取的情况下,同时进行多个单次伯努利试验不需要考虑样本是否足够大,只需要理解为同时发生了  $UF_{save}$  次伯努利试验的二项分布,并选择燃烧状态的燃料遇上了未燃烧的燃料事件。

$k = \frac{IT \times C_p}{FCV}$  为燃烧状态的燃料点燃未燃烧燃料的概率。其中,  $IT$  为着火温度,  $C_p$  为恒压比热容,  $IT \times C_p$  则是点燃碳粒所需要的热量;  $FCV$  为燃料的低位发热量,指燃料中的水分在燃烧过程结束后以水蒸气形式存在时的燃料发热量。  $k$  意味着燃烧态燃料遇上未燃烧燃料,且点燃了未燃烧燃料的数学期望。

(2) 燃料燃尽项  $\frac{dBF_{out}}{dt}$

基于着火项,已知一单位燃料的燃尽时间为  $\tau_e$ 。若时段  $\tau_e$  内单位燃料的燃烧比例与时间成正比,即认为  $\frac{\text{燃烧量}}{\text{单位量}} = \frac{t}{\tau_e}$ 。  $t$  时刻前,若燃料尚未燃尽,则燃烧量为  $BF_{save} \cdot \frac{t}{\tau_e}$ 。由于一单位燃料经过时间  $\tau_e$  后会燃尽,故每一个  $t$  时刻下,燃料都会燃尽  $[\frac{t}{\tau_e}]$  次,总共燃尽了  $BF_{save} \cdot (\frac{t}{\tau_e} - [\frac{t}{\tau_e}])$ 。该燃料燃尽项的表达式是基于燃烧速度与燃烧态燃料数量无关的假定,若认为燃烧速度与燃烧态燃料的数量有关,则需要对模型做进一步修正。

笔者通过环境温度与着火温度的比值对燃烧速度进行修正。该观点基于如下假定:若环境温度高于着火温度,则该燃烧速度快于着火温度下的燃烧速度;若环境温度低于着火温度,则仅基于燃料与燃烧态燃料的碰撞概率和着火概率计算燃烧扩散期望。基于上述考虑,修正后的燃料燃尽时间核算见式(8)。

修正后的燃料燃尽时间核算见式(8)。

$$\bar{\tau} = f(BF_{save}, t) = \begin{cases} \frac{RT(BF_{save}, t)}{IT} \tau_e, & RT > IT \\ \tau_e, & RT \leq IT \end{cases} \quad (8)$$

其中,考虑累积效应的环境温度函数见式(9)。

$$RT(BF_{save}, t) = \int_0^t \frac{Mm \cdot FCV}{C_{p-air} \cdot SA} BF(i)_{save} di \quad (9)$$

其中,积分下限的含义是,自启动时,累计各次燃尽的单位燃料所花费的总时间;积分上限的含义是,自上一个燃尽周期被点燃的燃料至现在已经燃烧了多久时间。对该式在上述积分区间上积分,即可得到新一轮燃尽周期开始后的环境温度,进而计算修正后的燃料燃尽时间。环境温度与消费“过热”的概念有相似之处,本文设定一个市场的基本温度  $IT$ ,只有超过该温度时,消费才能被反映为“过热”。

#### 2.2.4 原材料剩余方程

$$\frac{dRM_{save}}{dt} = \frac{dRM_{in}}{dt} - \frac{dRM_{out}}{dt} \quad (10)$$

其中,原材料输入项  $\frac{dRM_{in}}{dt}$  可通过资源分配方程确定,即

$$\min \{ C \cdot RM_{use} - UF_{use} \}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} RM_{use} \leq RM_{in} \\ UF_{use} \leq UF_{in} \\ RM_{use}, UF_{use} \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

接着推广为多目标规划,进一步满足最大产出目标。

$$\max_{t, UF_{save}, BF_{save}, RM_{save}, PQ_{raising}, RC_{save} \geq 0} PQ_{raising}(t; UF_{save}, BF_{save}, RM_{save}, PQ_{raising}, RC_{save})$$

借鉴 Leontief 的投入产出模型作为产出模型。其中,  $A$  为直接消耗系数矩阵,表示供给生产材料的部门供给的材料占生产部门产品总价值的比例,此时有最优解:

$$\frac{dPQ_{raising}}{dt} = A^{-1} \cdot \min \left\{ \frac{dRM_{in}}{dt}, \frac{1}{C} \cdot \frac{dBF_{out}}{dt} \right\} \quad (11)$$

原材料输出项  $\frac{dRM_{out}}{dt} = A \cdot \frac{dPQ_{raising}}{dt}$ , 通过直接消耗系数矩阵  $A$  的换算,确定原材料单位时间的输出变化量:

$$\frac{dRM_{out}}{dt} = \min \left\{ \frac{dRM_{in}}{dt}, \frac{1}{C} \cdot \frac{dBF_{out}}{dt} \right\} \quad (12)$$

简化起见,本方程考虑用  $ROI$  参数表示直接消耗系数矩阵  $A$ , 令  $C = \frac{SEC \times MVC}{ROI - SEC \times MVC}$ 。

#### 2.2.5 产出方程

只需将原材料输出项通过直接消耗系数矩阵的逆

矩阵进行转换,即可得到产出项(11)。该方程作为总资源消耗方程的输入项,并不直接构成社会再生产过程的子过程。作为宏观经济模型的目标函数,该方程体现了产出对生产的指标功能。

### 2.3 微分方程模型

上述隐式微分方程所确定的目标函数有数学规划形式的约束极值问题。

$$\max_{t, UF_{save}, BF_{save}, RM_{save}, PQ_{raising}, RC_{save} \geq 0} PQ_{raising}(t; UF_{save}, BF_{save}, RM_{save}, PQ_{raising}, RC_{save})$$

$$\text{s. t. } \int_0^t \left( \frac{dUF_{in}}{dx} + \frac{dRM_{in}}{dx} \right) dx \leq \int_0^t \frac{dRC_{save}}{dx} dx$$

该方程的含义是,在任意时刻下,燃料的累积输入量与原材料的累计输入量总和,不能超过总资源的累计输入量。基于模型推导,汇总出如下目标函数的隐式动力学微分方程组:

$$\begin{cases} \frac{dRC_{save}}{dt} = \frac{dPQ_{raising}}{dt} - RC_{save} \cdot TE - (BF_{save} + ROI \cdot PQ_{save}) \cdot \frac{RC_{save} - RM_{save} - UF_{save}}{RC_{save}}, \\ \frac{dUF_{save}}{dt} = \frac{IT \times C_p}{FCV} \times \frac{UF_{save} \times BF_{save}}{(UF_{save} + BF_{save})^2} \cdot \left( \frac{RC_{save} - UF_{save} - RM_{save}}{RC_{save}} - UF_{save} \right), \\ \frac{dBF_{save}}{dt} = UF_{save} \times \frac{IT \times C_p}{FCV} \times \frac{UF_{save} \times BF_{save}}{(UF_{save} + BF_{save})^2} - BF_{save} \cdot \left( \frac{\varepsilon t}{\tau} - \left[ \frac{\varepsilon t}{\tau} \right] \right), \\ \frac{dRM_{save}}{dt} = \frac{RC_{save} - RM_{save} - UF_{save}}{RC_{save}} \cdot ROI \cdot \int_0^t \frac{dPQ_{raising}}{dt} di - ROI \cdot \frac{dPQ_{raising}}{dt}, \end{cases}$$

$$\text{其中, } \frac{dPQ_{raising}}{dt} = \frac{1}{ROI} \cdot \min \left\{ \frac{dRM_{in}}{dt}, \frac{ROI - SEC \times MVC}{SEC \times MVC} \cdot \frac{dUF_{in}}{dt} \right\}$$

至此,对再生产体系的动力学建模完成,下一章将基于该模型的数学方程做出数值模拟。

## 3 数值模拟及结果阐释

### 3.1 数值模拟结果

基于经验,设定模型变量的初始值为  $(UF_{save},$

$BF_{save}, RM_{save}, PQ_{raising}, RC_{save}$ ) = (200, 300, 200, 300, 1 000)。通过对该模型进行数值模拟,并将模拟过程通过 MATLAB 微分方程求解器求解,结果如图 4 及图 5 所示。

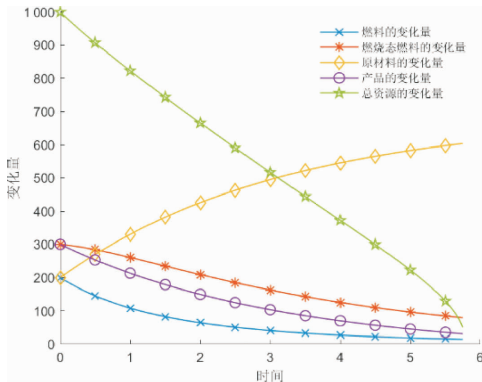


图 4 变化量模拟结果

Fig. 4 Results of variation simulation

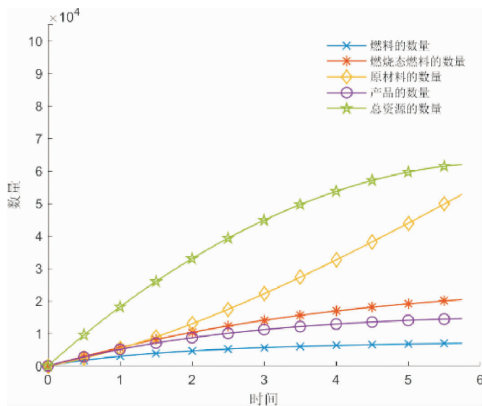


图 5 数量模拟结果

Fig. 5 Results of quantity simulation

由图 4 可知,当原材料数量曲线超过总资源数量曲线时,大量的原材料被闲置而不进行生产。其原因是燃料不足以提供动力支撑原材料投入生产,进而导致生产停滞。投入产出模型反映的经济系统必须经常进行调整,其崩溃时间为无穷大的概率为零。图 5 展示的曲线是由图 4 相应的变化量曲线积分而来,其中,原材料的数量曲线呈现为生态学种群变化的“J”型曲线,其余数量曲线均呈现为生态学种群变化的“S”型曲线,其原因是原材料的投入量受到产出量的激励。

### 3.2 模拟结果分析

在产品未进入再生产循环时,有限的自然资源趋向于耗尽,燃料与原材料最终都投入到产品生产过程中。在模型的数值解趋于稳定后,除产品外,其他变化量均消耗至零。数值模拟结果与现实情况相符,接下来对方

程组中的各个方程逐个进行解释。

#### 3.2.1 燃烧态燃料剩余方程

燃烧态燃料剩余方程的输出项不会成为其他方程的输入项,故可以认为该项是整个微分方程组的“末端”。观察燃料燃尽项的表达式  $BF_{save} \cdot \left( \frac{\varepsilon t}{\tau} - \left[ \frac{\varepsilon t}{\tau} \right] \right)$ , 每次  $t = k\tau_e, k \in N^*$  时,  $\left( \frac{\varepsilon t}{\tau} - \left[ \frac{\varepsilon t}{\tau} \right] \right)$  的值会在到达 1 后返回 0, 即  $\frac{\varepsilon t}{\tau} - \left[ \frac{\varepsilon t}{\tau} \right] \in [0, 1)$ , 故燃烧态燃料的“自我激励”会被定期清除,表示消费活动具有一次性和有限记忆性,即消费效用之于劳动活动的转化率是一次性的并随时间衰减的,  $\tau$  体现了消费效用的衰减周期(图 6)。

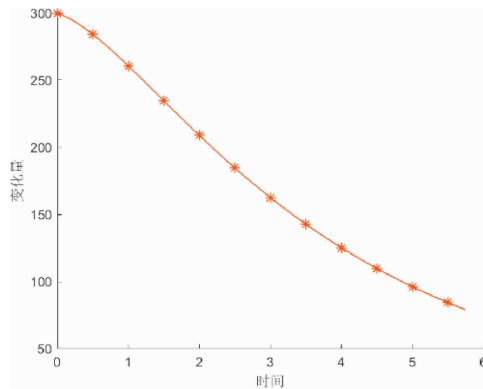


图 6 燃烧态燃料的变化量曲线

Fig. 6 Variation curve for fuel in combustion state

#### 3.2.2 原材料剩余方程与燃料剩余方程

原材料剩余方程与燃料剩余方程的形式十分相似,存在共性,故将二者放在一起讨论。二者的输入项可以联立为具有 Lotka-Volterra 模型形式的微分方程组,见式 (3) 和式 (4)。原材料与燃料二者形成阻滞增长现象,如图 7 和图 8 所示。

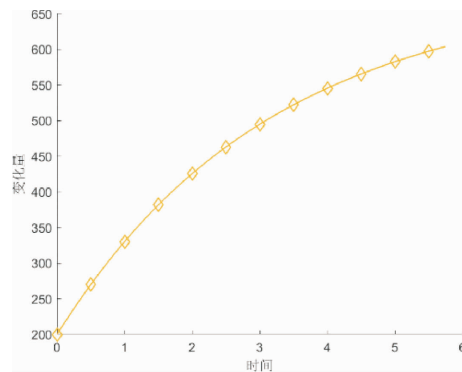


图 7 原材料的变化量曲线

Fig. 7 Variation curve of raw materials

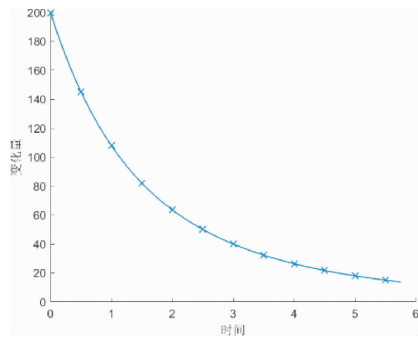


图 8 燃料的变化量曲线

Fig. 8 Variation curve of fuels

观察二者的输出项:原材料的输出项在产出方程的表述中阐释,当  $BF_{save}$  变化较小时,输出项在数值上有负增长的阻滞现象。燃料的输出项见式(13),可以表述为概率期望值:

$$\frac{dUF_{out}}{dt} = -UF_{save} \times k \times \frac{UF_{save}}{UF_{save} + BF_{save}} \times \left(1 - \frac{UF_{save}}{UF_{save} + BF_{save}}\right) \quad (13)$$

其中,  $UF_{save}$  为随机变量,  $k \times \frac{UF_{save}}{UF_{save} + BF_{save}} \times \left(1 - \frac{UF_{save}}{UF_{save} + BF_{save}}\right)$  代表未燃的燃料与已燃的燃料相遇并使未燃的燃料被点燃的事件概率。事件概率在形式上满足单种群的 logistic 模型,即  $\frac{dx}{dt} = rx(1 - S \frac{x}{n})$ 。当

$r = \frac{IT \times C_p}{FCV}, S = 1, n = 1$  时,燃料输出项为单种群 logistic

模型的一个特例。

### 3.2.3 总资源消耗方程

总资源消耗方程各项变化量的形式依然符合 Lotka-Volterra 模型的变化量特征,对各项加总可以认为是对 Lotka-Volterra 模型中各种群数量的加总。如果把所有种群看作一个整体,那么该整体对总资源的消耗速率依然符合 logistic 模型,如图 9 所示。

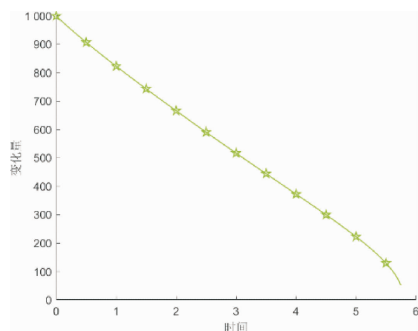


图 9 总资源的变化量曲线

Fig. 9 Variation curve of total resources

总资源的变化量在不断减小,在数量上体现为生态学种群变化的“S”型曲线。对封闭经济系统而言,总资源的变化速率受限于第二类永动机的不可能性,即没有能量转化效率 100% 的热机,故无论如何高效地进行生产,封闭经济的资源利用效率都在马尔科夫链式的生产过程中损耗。

### 3.2.4 产出方程

产出方程整体表现为整数,可以表示为

$$\frac{dPQ_{raising}}{dt} = \frac{1}{ROI} \cdot \min \left\{ \frac{dRM_{in}}{dt}, \frac{ROI - SEC \times MVC}{SEC \times MVC} \cdot \frac{dBF_{out}}{dt} \right\} \quad (14)$$

该方程在原材料输出项的基础上,通过乘入投入产出比进行转换后得到,故其变化量在形态上仍符合 Lotka-Volterra 模型的变化量特征,如图 10 所示。

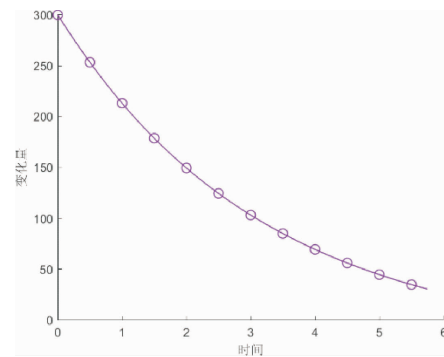


图 10 产品的变化量曲线

Fig. 10 Variation curve of products

图 10 表现了生产活动的效率损耗过程,每次生产活动都基于资源用于燃料与用于原材料的比例进行。而原材料的投入直接受到产出的激励,但燃料受产出的影响相对较弱,进而导致资源错配,消费转化的劳动量无法支撑起如此激进的原材料投入。持续的错配导致产出效率不断下降。

## 4 结 论

本文通过文献梳理,总结了马克思政治经济学与循环经济、能源经济在理论构建思想上的一致性。然后按照马克思政治经济学的再生产循环图式,构建以地区再生产体系为研究对象的投入产出动力学模型,并对该模型进行数值模拟和含义阐释。基于再生产理论的投入产出法表述,在能源经济 STER 模型构建思想指导下,引入燃烧模型描述宏观经济的消费现象,将消费带来的再

生产劳动量与燃烧对外的做功量进行类比表述,建立扩大再生产两大部类的经济增长动力学模型,并进一步对该模型进行理论分析和数值模拟。该模型的“功-能”转换,即类似内需拉动的国内再生产循环,燃烧对外做功推动的外界资源循环则是基于消费驱动的再生产循环,对外深度参与全球价值链分工和劳动成果分配。研究发现,对第二部类的投入超出总资源数量时,意味着大量的资源被闲置。其原因是燃料短缺,难以提供足够动力支撑原材料生产,导致生产停滞。在总资源被持续消耗这一特定背景下,国际上近期兴起的单边主义无疑会阻碍最终产品合理分配,进而会降低全球生产网络的连通性。

本文构建的生产模型具有循环经济特征,因此,对多微观个体聚合的宏观经济建模方法具有一定启示。

利用“top-down”建模思想指导建立的“消费-生产”动力学模型,可被用于“bottom-up”建模方式的宏观经济结构的微观个体聚合式建模,进而模拟经济体自组织现象下宏观经济运行的微观动力机制。扩大再生产体系的经济增长动力学模型既可以描述一个经济主体自给自足的状态,也可以描述一个经济主体产生剩余的积累过程。当有两个经济主体时,二者的交换行为会因为各自的比较优势而导致二者都获得帕累托改进;当两个经济主体达到交换均衡即全局最优时,二者可以加总为一个整体,进而从微观个体模型聚合成宏观整体模型。此时,经济主体在均衡状态下的可加性使得两大部类扩大再生产的经济增长动力学模型具有微观个体聚合的宏观整体结构,意味着该模型不仅可以描述宏观经济现象,也可以描述微观个体行为。

#### 参考文献:

- [1] 冯志轩,乔晓楠. 基于投入产出方法的政治经济学经验研究述评[J]. 政治经济学评论,2019,10(6):155-182.
- [2] 马克思. 1844年经济学哲学手稿[M]. 中共中央马克思恩格斯列宁斯大林著作编译局,北京:人民出版社,2000.
- [3] 赵敦华. 西方哲学简史[M]. 北京:北京大学出版社,2001.
- [4] 全增嘏. 西方哲学史(上册)[M]. 上海:上海人民出版社,1983.
- [5] 杨一之. 康德黑格尔哲学讲稿[M]. 北京:商务印书馆,1996.
- [6] 中共中央马克思恩格斯列宁斯大林著作编译局. 马克思恩格斯全集(第二十八卷)[M]. 北京:人民出版社,1972.
- [7] Su B, Heshmati A, Geng Y, et al. A review of the circular economy in China: Moving from rhetoric to implementation[J]. Journal of Cleaner Production, 2013,42(3):215-227.
- [8] Kandelaars P P A A H. Economic models of material-product chains for environmental policy analysis[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers,1999.
- [9] Mathijs B, Reinout H, Ester V D V, et al. Material flows and economic models: An analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models[J]. Ecological Economics,2000,32(2):195-216.
- [10] Pittel K, Amigues J P, Kuhn T. Endogenous growth and recycling: A material balance approach[R]. Zurich: CER-ETH Economics Working Paper Series, 2005.
- [11] Leontief W. Environmental repercussions and the economics structure: An input-output approach[J]. The Review of Economics & Statistics,1970,52(3):262-271.
- [12] Leontief W, Ford D. Air pollution and the economic structure: Empirical results of input-output comparisons[M]//Leontief W. Input-Output Economics (Second Edition). Oxford: Oxford University Press,1972.
- [13] Nakamura S. Input-output analysis of waste treatment and recycling[J]. Journal of the Japan Society of Waste Management Experts, 2000,11(2):84-93.
- [14] Nakamura S, Kondo Y. Input-output analysis of waste management[J]. Journal of Industrial Ecology,2002,6(1):39-63.
- [15] Londero E. Secondary products, by-products and the commodity technology assumption[J]. Economic Systems Research, 1999,11(2):195-203.
- [16] 陆学,陈兴鹏. 循环经济理论研究综述[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(S2):204-208.
- [17] 张智光. 面向生态文明的超循环经济:理论、模型与实例[J]. 生态学报,2017,37(13):4549-4561.
- [18] 王军. 基于能源经济 CGE 模型的我国社会核算矩阵 SAM 表编制[J]. 统计与决策,2019,35(20):5-10.
- [19] Hall C A S, Powers R, Schoenberg W. Peak oil, EROI, investments and the economy in an uncertain future[M]//Pimentel D (Ed.). Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems, 1st ed. Berlin: Springer, 2008:109-132.
- [20] Heun M K, Wit M D. Energy return on (energy) invested (EROI), oil prices, and energy transitions[J]. Energy Policy,

- 2012(40):147-158.
- [21] Hamilton J D. Causes and consequences of the oil shock of 2007 - 08[J]. *Brookings Papers on Economic Activity*, 2009, 40(1): 215-283.
- [22] Rubin J. *The end of growth*[M]. Toronto: Random House, 2012.
- [23] Forrester J W. Systems analysis for social policies(book reviews: Urban dynamics)[J]. *Science*, 1970(168):693-694.
- [24] Meadows D H, Meadows D L, Randers J, et al. *The limits to growth: A report for the club of Rome's project on the predicament of mankind*[M]. New York: Universe Books, 1972.
- [25] Naill R F. Managing the discovery life cycle of a finite resource: A case study of the US natural gas industry[J]. *Massachusetts Institute of Technology*, 1972(1):123-125.
- [26] Qudrat-Ullah H. Energy policy modeling in the 21st century: An introduction[M]. New York: Springer, 2013.
- [27] Hounam I. STER—A global energy supply model[C]//Kavanagh R. III. *The Energy Systems Analysis: Proceedings of the International Conference*. Dublin: The Commission of the European Communities and the National Board for Science and Technology, 1979:447-455.
- [28] 吴易风. 马克思的经济增长理论模型[J]. *经济研究*, 2007(9):11-17.
- [29] 丁肖逵. 从马克思扩大再生产公式来研究生产资料优先增长的原理[J]. *经济研究*, 1956(4):23-40.
- [30] 鲁从明. 两大部类生产增长速度快慢是不断交替的过程[J]. *经济研究*, 1980(5): 48-53.
- [31] 刘恩钊. 两大部类关系和生产资料生产优先增长[J]. *经济研究*, 1980(2):34-40.
- [32] 王艺明, 刘一鸣. 马克思主义两大部类经济增长模型的理论与实证研究[J]. *经济研究*, 2018(9):37-51.
- [33] 赵峰, 赵翌辰, 李帮喜. 马克思两大部类模型与中国经济的宏观结构: 一个经验研究[J]. *中国人民大学学报*, 2017, 31(2):73-81.
- [34] 赵峰, 李彬. 马克思两部类模型视角下的中国省域经济结构分析[J]. *马克思主义研究*, 2017(4):61-68.
- [35] 苏立君, 梁俊尚. 构建国内国际经济双循环的政治经济学投入产出分析[J]. *数量经济技术经济研究*, 2021, 38(9):3-24.
- [36] 孟捷, 冯金华. 复杂劳动还原与产品的价值决定: 理论和数理的分析[J]. *经济研究*, 2017(2):187-198.
- [37] 苏立君, 梁俊尚. 复杂劳动还原理论的重构及其对价值价格偏离模型的修正[J]. *政治经济学评论*, 2022, 13(1):160-182.
- [38] Okisio N. A mathematical note on Marxian theorems[J]. *Weltwirtschaftliches Archiv*, 1963(91):287-299.
- [39] 李海明, 祝志勇. 扩大再生产的动态最优模型——马克思经济增长理论的一个解说[J]. *经济科学*, 2012(6):12-22.
- [40] 徐春华. 生产资料部类优先增长: 理论逻辑与经验证据[J]. *经济学动态*, 2017(2): 25-36.
- [41] 李帮喜, 刘充, 赵峰, 等. 生产结构、收入分配与宏观效率——一个马克思主义政治经济学的分析框架与经验研究[J]. *经济研究*, 2019(3):181-193.

【责任编辑: 卓祯雨】