

循环经济产业系统的分室模型与模拟^①

杨忠直¹, 孔鹏志², 李博英¹

(1. 上海交通大学, 上海 200052; 2. 山东财经大学, 济南 250014)

摘要: 通过构建循环经济产业系统结构, 建立了资源循环利用的分室模型及其动态方程系统; 定义了测量资源循环利用效率的循环倍数及其计算公式. 模拟结果显示资源循环利用不仅能够实现自然资源的数量积累, 提高资源循环利用效率, 还能够通过产业创新优化循环经济产业系统结构, 降低对自然环境的废物排放. 本文所研究的循环经济产业系统的分室模型方法还可以用来检测区域经济系统, 国民经济系统或生态产业园区等资源循环利用效率和环境排放程度.

关键词: 循环经济; 资源循环利用; 分室模型; 循环倍数

中图分类号: F205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2016)11-0054-09

0 引言

一次性资源利用的经济是“从资源采掘, 投入产品生产, 经过产品消费, 到废物排放”的一次性资源利用的经济模式, 导致资源利用的高投入低效率, 废物的高排放和环境恶化. 一次性资源利用的经济也称为“线性经济模式”(linear economy, LE). 资源循环利用经济是从资源采掘, 投入产品生产, 经过流通和消费, 到达产品寿命结束状态; 在对寿命结束产品, 采取再使用和再制造措施使产品能够继续使用, 最后到达资源化并最终处置状态; 将资源化物质再投入生产过程, 不可资源化的物质排放或暂时储存. 资源循环利用经济称为“循环经济模式”(circulatory economy, CE or recycling economy), 它使资源循环利用而数量积累, 对环境的不可资源化物质排放量减少到最小.

分室模型(compartment model)是用来描述和分析系统中生物和非生物体数量变动关系的结构

模型, 它将系统的每个状态变量视为一个“分室”, 研究分室之间物质、能量和信息的转移和相互作用关系, 以及环境变化对系统及各分室状态的扰动. 对各分室的状态变量及分室间的状态转移关系建立动态方程系统, 通过模拟和实时检测系统状态的演化规律. 1957年 Odum^[1]构造了一个分室结构的概念框架, 用来描述河流生态系统(silver springs, florida)的基本结构和运动规律, 分析生物群体的能量流, 生产率和代谢机制. Odum^[2]又借用分室结构框架描述和分析了经济系统与环境的物质和能量的交换和代谢的工作机制. Odum^[3]正式提出生态系统的分室模型, 通过定义分室之间的转换系数来描述能量流, 物质与生物组织的运动规律, 进而可以用计算机在分室能力和规模约束下进行模拟. Eriks-son^[4]在数学上提出了可以广泛用于各种生态系统分室建模的“水库理论”(reservoir theory). Matis等^[5]在关于生态系统分室模型理论的论文集, 系统地论述了有关生态系统分室建模理论,

① 收稿日期: 2014-07-07; 修订日期: 2015-12-30.

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(06BJY045).

作者简介: 杨忠直(1956—), 男, 陕西富平人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: zzyang@sjtu.edu.cn

分室模型的参数识别和统计估计,生态系统分室模型的随机方法和生态系统分室模型的数学分析等内容. Nicolette 等^[6]运用图论研究了基于输入输出数据的线性分室模型的结构参数识别问题,为大数据分室系统建模提供了数学方法. 张文贵^[7]研究了生物系统分室模型方程组解的存在性和可控性问题,提出了有解和可控性的数值证明方法. 刘铁斌和韩纯儒^[8]在调查的基础上运用分室模型实验研究了北京窦店村农业生态系统营养物循环的结构和运动规律. 孔鹏志和杨忠直^[9]建立了我国经济环境系统的分室模型,运用实际数据初步分析了生产、消费和废弃物处理的物质流代谢过程. 初步分析了王昀和宋乃平^[10]建立的农牧业复合生态系统的分室模型,研究物质流循环的生态平衡和系统的稳定性问题.

本文的研究工作是,为了提高资源利用效率和降低对环境的排放,建立了循环经济产业系统资源循环利用的分室模型,并进行了数值模拟分析. 在分室模型动态方程的基础上,定义了资源

循环利用倍数及其计算公式,用以测定经济系统资源循环利用效率和对环境减少排放的效果. 本文的模拟结果显示经济系统的资源循环利用不仅能够实现自然资源的数量积累,还能够通过产业创新(包括产业技术创新,产业组织创新和产业规制创新等)优化产业结构,提高资源循环效率,降低对环境的污染排放.

1 循环经济产业系统的分室模型

1.1 循环经济产业系统的结构

资源一次性使用的线性经济模式(linear economy, LE)是从资源投入,经过产品生产和产品使用,最终到产品废弃. 政府追求经济高速增长,企业追求最大化利润,大量开发使用可枯竭性使用资源,生产和消费的废弃物排放给大自然. 这种经济模式将使自然资源加速枯竭,环境状况加剧恶化,进而威胁到人类经济社会的可持续发展. 线性经济模式的物质流程如下图.

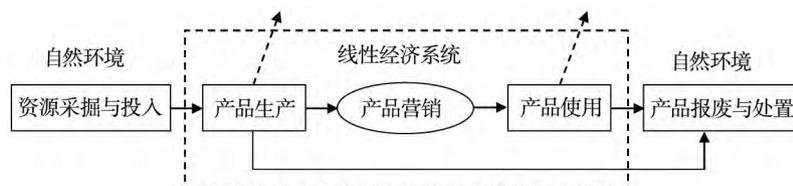


图 1 线性经济模式的单方向资源物质流程

Fig. 1 Structure of one-way resources utilization in linear economy

图 1 中虚线区域为资源一次性利用的线性经济模式系统,其外部为自然环境;实线箭头表示物质流传递方向,虚线箭头表示物质逸出经济系统.

资源循环利用的经济是将经济系统置于自然生态系统中构成循环经济(circulate economy, CE)系统,使其资源利用能够像自然生态系统的物质循环代谢那样长久运行. 循环经济产业系统的资源循环代谢关系如图 2.

图 2 中虚线区域为物质循环利用的循环经济产业系统,其外部为自然环境;实线箭头表示物质流传递方向,虚线箭头表示物质逸出经济系统.

1.2 循环经济产业系统的分室建模与求解

为了对循环经济产业系统中资源循环利用定量分析,将图 2 中涉及的 3 个市场视为无阻物品交换通道,建立循环经济产业系统的分室结构模型如下图.

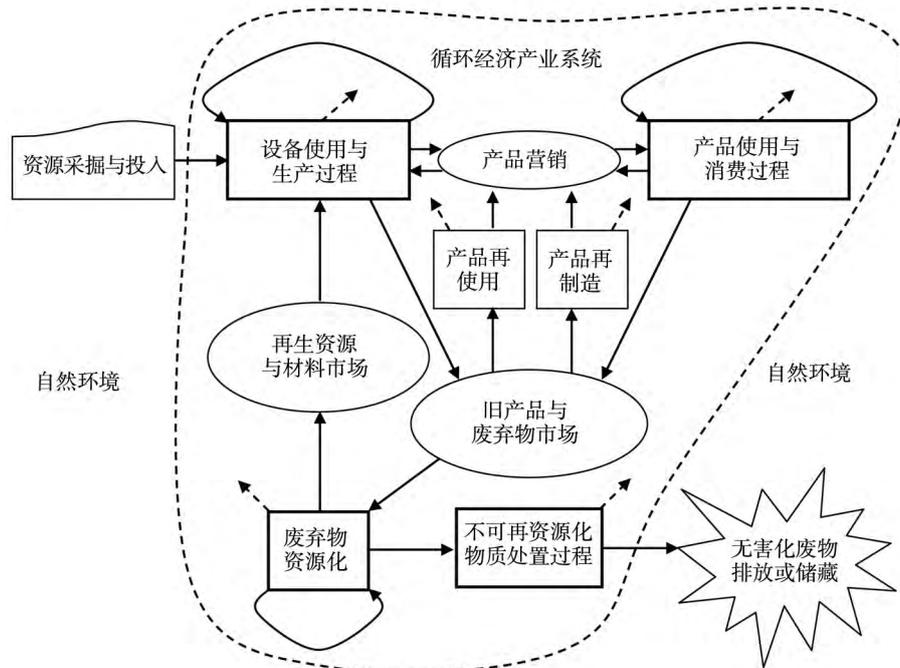


图2 循环经济模式的物质流循环过程

Fig. 2 Structure of resources recycling utilization in circulatory economy

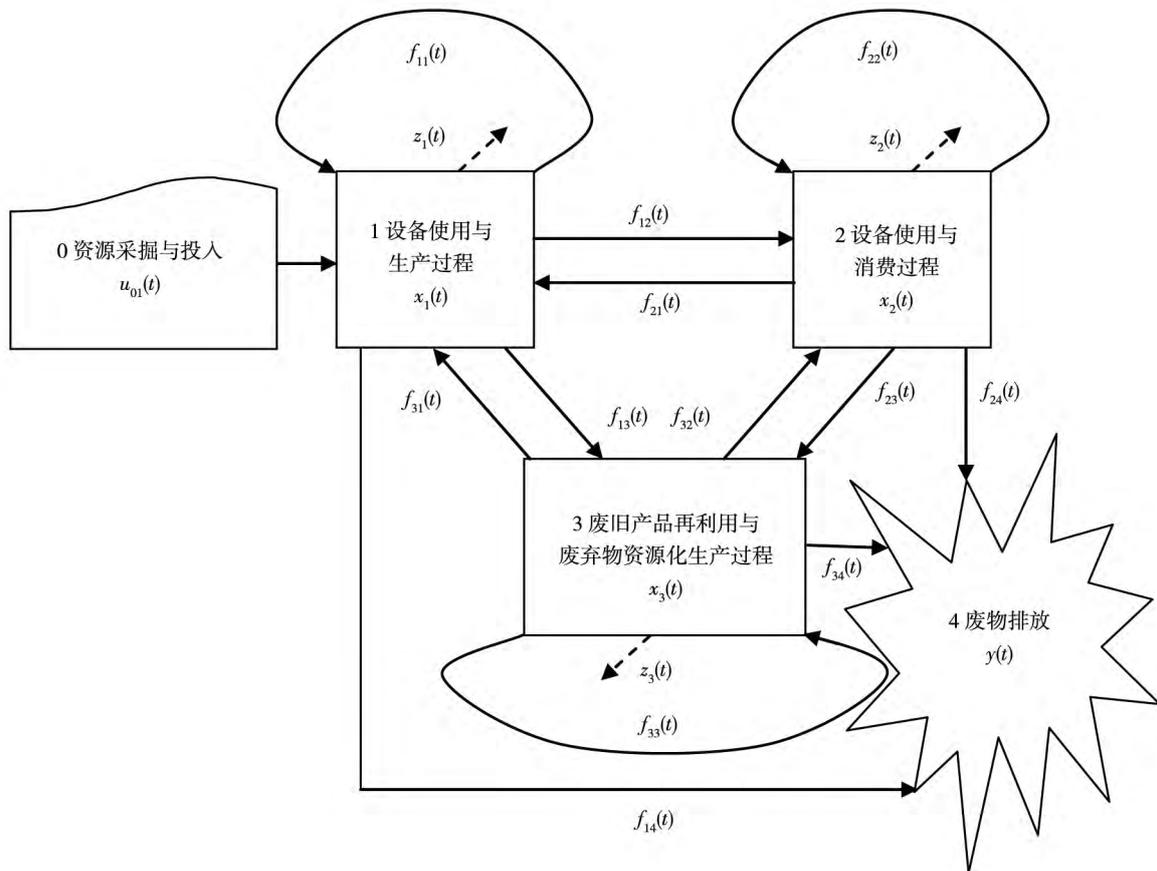


图3 循环经济产业系统资源循环利用的分室模型

Fig. 3 Compartment model of resources recycling utilization in circulatory economy

图 3 中方框表示分室,并用 $i = 1, 2, 3$ 进行编号, $x_i(t)$ 表示 i 分室在 t 时刻的状态; $f_{ij}(t)$ 表示 t 时刻从分室 i 流入分室 j 的物质流量,且 $f_{ij}(t) \geq 0$; $u_{01}(t)$ 表示 t 时刻分室 1 从自然界获取的资源量; $y(t)$ 表示 t 时刻从循环经济产业系统向自然环境的排放物质量.

为建立循环经济产业系统的分室动力学方程,定义系统结构参数或物质传递系数

$$a_{ij}(t) = \frac{f_{ij}(t)}{x_i(t)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} dx_1(t)/dt &= -a_{11}(t)x_1(t) + a_{21}(t)x_2(t) + a_{31}(t)x_3(t) + u_{01}(t) \\ dx_2(t)/dt &= a_{12}(t)x_1(t) - a_{22}(t)x_2(t) + a_{32}(t)x_3(t) \\ dx_3(t)/dt &= a_{13}(t)x_1(t) + a_{23}(t)x_2(t) - a_{33}(t)x_3(t) \\ y(t) &= a_{14}(t)x_1(t) + a_{24}(t)x_2(t) + a_{34}(t)x_3(t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $a_{ij}(t) \in [0, 1]$.

为了分析方便,设系数 $a_{ij}(t)$ 为常数,式(2)表述为

$$\begin{aligned} dx_1(t)/dt &= -a_{11}x_1(t) + a_{21}x_2(t) + a_{31}x_3(t) + u_{01}(t) \\ dx_2(t)/dt &= a_{12}x_1(t) - a_{22}x_2(t) + a_{32}x_3(t) \\ dx_3(t)/dt &= a_{13}x_1(t) + a_{23}x_2(t) - a_{33}x_3(t) \\ y(t) &= a_{14}x_1(t) + a_{24}x_2(t) + a_{34}x_3(t) \end{aligned} \quad (3)$$

记 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T$, 参照 Zadeh and Desoer^[7] 和张文贵^[12], 只要式(3)的系数矩阵满秩, 则式(3)各分室物质流量的通解为

$$\mathbf{x}(t) = \Phi(t, 0)\mathbf{x}(0) + \int_0^t \Phi(t, \tau)B\mathbf{u}(\tau) d\tau \quad (4)$$

其中 $\Phi(t, \tau) = e^{A(t-\tau)} = I + \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{A^k(t-\tau)^k}{k!}$,

$$A = \begin{bmatrix} -a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & -a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & -a_{33} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_{01}(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

由此可见,各分室的状态由初始状态 $\mathbf{x}(0)$ 和各期投入 $\mathbf{u}(t)$ 两部分确定,而转移比例 $a_{ij}(t)$ 的循环影响通过 $\Phi(t, \tau)$ 来实现.

并给出下列约束条件.

假定 1 系统结构参数为常数,满足叠加性原理和齐次性条件.

假定 2 所有物质流量的转移比率由供应分室控制.

假定 3 物质的流动是无时滞的,即某一分室的供给发生变化当即影响下游分室.

于是图 3 所示的物质循环过程表示为

2 物质循环倍数与系统结构优化

2.1 物质循环倍数

在循环经济产业系统中,物质的循环流量随着时间的推移不断积累. 初始物质质量在循环经济产业系统中循环利用的积累量与其初始物质质量的比值反映了资源循环利用的效率,这个比值称为物质循环倍数(material circulation multiplier)或物质积累倍数(material accumulation multiplier).

对于式(3)表述的循环经济产业系统,各分室的物质循环积累量为

$$TM_i = \int_0^{+\infty} x_i(t) dt \quad (5)$$

则各分室的物质循环倍数定义为

$$CM_i = \frac{TM_i}{x_{0i}} \quad (6)$$

其中 x_{0i} 为第 i 分室的初始物质存量. 循环经济产业系统的物质循环倍数定义为

$$CM = \sum_{i=1}^n \frac{x_{0i}}{\mathbf{e}^T \mathbf{x}_0} CM_i \quad (7)$$

其中 $\mathbf{e}^T \mathbf{x}_0 = \sum_{i=1}^n x_{0i}$ 为循环经济产业系统初始状态的物质总存量.

利用物质循环倍数可以度量一单位物质在投入循环经济产业系统中循环利用的总量效果. 由于经济系统生产力的作用,一般均有 $CM_i > 1$, $CM > 1$; 且 CM_i (CM) 越大,说明一单位物质投

入量的倍数作用越大,循环经济产业系统的物质循环利用的效率就越高。

上述分室模型描述了循环经济产业系统是通过投入自然资源进行生产和消费,对其后的废旧物品进行再利用和资源化,将再生资源再投入到生产过程,形成循环物质流。正是由于这种物质循环,减少了从自然界的资源摄取,实现了资源节约和充分利用,也创造了更多的国民产值;也正是由于这种资源循环利用,减少了排入自然环境的废弃物,保护了人类赖以生存的自然环境。

2.2 循环经济产业系统的优化方法

在资源循环利用的产业链网建立之后,可以通过产业创新(包括产业技术创新,产业组织创新和产业规制创新等)优化循环经济产业系统结构,以达到资源最有效地循环利用。这样的工作可以通过对动态方程系统式(3)的结构参数进行优化调整来完成。改变物质传递系数 $a_{ij}(t)$,进而通过 $\Phi(t, \tau)$ 影响各分室在各时期的物质存量 $x_i(t)$ 的水平。产品的生产技术创新能够改变 f_{21} , f_{13} 和 f_{14} ; 产品的使用方式和消费理念的进步可能改变 f_{12} , f_{32} 和 f_{24} ; 而再使用,再制造以及资源化的技术创新则改变 f_{31} , f_{23} 和 f_{34} ,以提高废旧物品的再利用率。作为一个整体系统 $f_{ij}(t)$ 的变化对循环经济产业系统的影响必然反映出物质循环倍数的变化。若将物质循环倍数作为考察循环经济产业系统的效率指标,即分析 $f_{ij}(t)$ 的变化对 CM_i

或 CM 的影响,就可对循环经济产业系统进行三个方面的操作:一是对各分室 $f_{ij}(t)$ 进行灵敏度分析判定循环经济产业最优调整方向;二是在技术标准和政策的约束下选择优先发展的技术创新环节;三是在法律和规制的约束下通过产业组织创新对循环经济产业系统的产业链网进行扩张,收缩和衍生。因此,以循环倍数 CM_i 或 CM 的最大化为目标,对动态方程系统的结构参数 $a_{ij}(t)$ 进行优化调整,以达到提高资源循环利用效率和降低废物排放。

3 循环经济产业系统的数值模拟

3.1 系统数据设计

假设在循环经济产业系统初始时刻从自然环境中获取一次性资源投入 $u_{01}(0) = 100$,各分室初始时刻物质存量为 $x_1(0) = x_2(0) = x_3(0) = 0$ 。再假设各分室物质传递比例为 $f_{12} : f_{13} : f_{14} = 7 : 2 : 1$, $f_{21} : f_{23} : f_{24} = 1 : 5 : 4$, $f_{31} : f_{32} : f_{34} = 5 : 3 : 2$; 其中,第一个比例是考虑到现实废旧产品再利用投入不大,更多的产品被消费;第二个比例是考虑到产品消费有较大部分没有被回收利用而直接排出系统;第三个比例是考虑到废品回收主要有两种处理,一种是资源化后回到生产过程的再生资源,另一种是回到消费领域的产品再使用,并假定前者占的比例更大。在上述前提下, $a_{ij}(t)$ 为常数,由式(1)计算的结果如表1。

表 1 循环经济产业系统传递系数计算结果

Table 1 Simulation data of transform coefficients of economic eco-systems

a_{ij}	原始数值	系数含义	a_{ij}	原始数值	系数含义
a_{11}	1.00		a_{13}	0.20	生产废弃物进入资源化过程
a_{21}	0.10	不合格产品召回	a_{23}	0.50	消费废弃物进入资源化过程
a_{31}	0.50	废品资源化再投入生产过程	a_{33}	1.00	
a_{12}	0.70	产品进入消费过程	a_{14}	0.10	生产过程不可再利用废弃物排放
a_{22}	1.00		a_{24}	0.40	消费过程不可再利用废弃物排放
a_{32}	0.30	产品的再使用	a_{34}	0.20	再利用过程不可再利用废弃物排放

3.2 循环经济产业系统的物质循环模拟

将表 1 中的数据代入通解式(4),得到该

循环经济产业系统各分室物质数量的状态函数为

$$\begin{aligned}
 x_1(t) &\cong [11.22\sin(0.32t) + 69.84\cos(0.32t)] e^{-1.37t} + 30.16e^{-0.25t} \\
 x_2(t) &\cong [68.70\sin(0.32t) - 42.84\cos(0.32t)] e^{-1.37t} + 42.84e^{-0.25t} \\
 x_3(t) &\cong [-66.58\sin(0.32t) - 36.63\cos(0.32t)] e^{-1.37t} + 36.63e^{-0.25t}
 \end{aligned} \tag{8}$$

而各分室物质数量的积累函数为

$$\begin{aligned}
 TM_1(t) &\cong [3.41\sin(0.32t) - 50.02\cos(0.32t)]e^{-1.37t} - 120.32e^{-0.25t} + 270.34 \\
 TM_2(t) &\cong [-54.28\sin(0.32t) + 18.60\cos(0.32t)]e^{-1.37t} - 170.91e^{-0.25t} + 152.30 \\
 TM_3(t) &\cong [40.12\sin(0.32t) + 35.93\cos(0.32t)]e^{-1.37t} - 146.15e^{-0.25t} + 110.22
 \end{aligned} \tag{9}$$

通过模拟计算得到生产分室的物质循环倍数 $CM = CM_1 = 2.7034$, 即资源循环利用使 100 单位的物质投入积累了相当于 270.34 单位的物质投入数量, 这就是循环倍数效应. 而消费分室和再利用分室的物质循环倍数 $CM_2 = CM_3 = 0$, 这是因为假定这两个分室的初始物质数量为零. 随着模拟时间趋于无穷大, 可以观察到物质积累数量 $TM_2(\infty) = 152.30$, $TM_3(\infty) = 110.22$, 即 100 单位的物质投入在产生消费过程积累了 152.30 单位物质数量, 再利用过程积累了 110.22 单位的物质数量. 此外, 向自然界排出的物质积累数量为 $Ty(\infty) = 0.1TM_1(\infty) + 0.2TM_2(\infty) + 0.4TM_3(\infty) = 100$, 即物质排出的总积累数量刚好等于初始资源投入数量, 这遵循物质数量守恒定律. 与线性经济模式相比, 虽然排出总积累数量相同, 但由于资源循环利用使得每期(或单位时间)的排出数量减小, 这就有利于环境的恢复和改善. 循环经济产业系统各分室物质数量状态和物质数量积累水平, 以及系统对自然环境的排放情况如图 4 图 5.

线性经济模式中 $a_{31} = a_{32} = 0$, $a_{34} = 1.0$, 与循环经济模式中各分室及整个系统排出的物质数量状态和数量积累的比较如图 6 ~ 图 9.

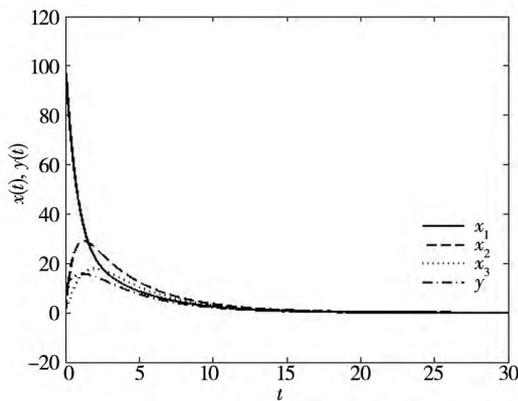


图 4 各分室及排出物质数量状态曲线

Fig. 4 State curves of each compartment and excretion

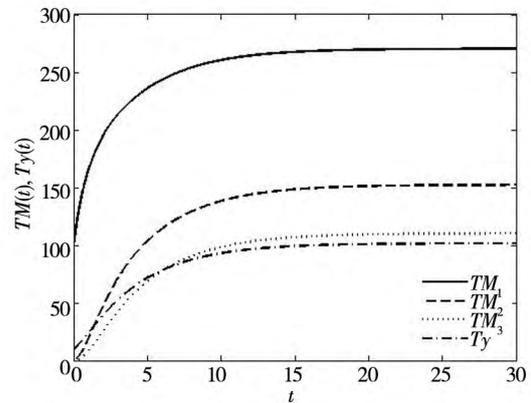


图 5 各分室及排出物质数量积累曲线

Fig. 5 Accumulation curves of each compartment and excretion

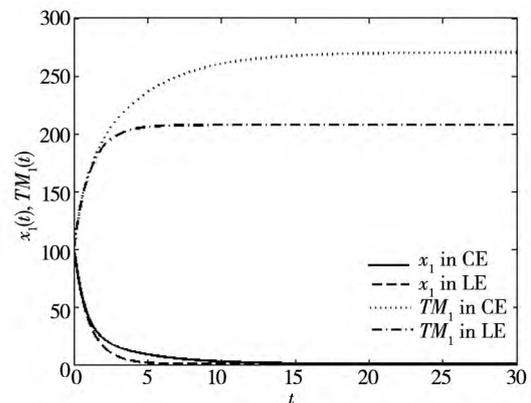


图 6 生产分室状态与积累曲线比较

Fig. 6 Comparison of state and accumulation curves in production compartment

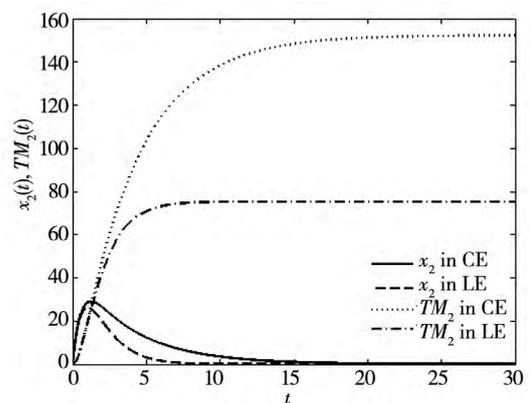


图 7 消费分室状态与积累曲线比较

Fig. 7 Comparison of state and accumulation curves in consumption compartment

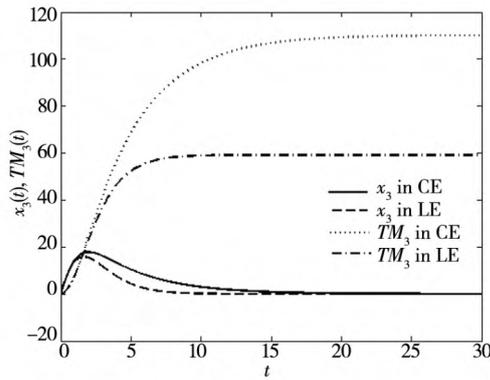


图8 废品再利用分室状态与累积曲线比较

Fig. 8 Comparison of state and accumulation curves in recycling utilization compartment

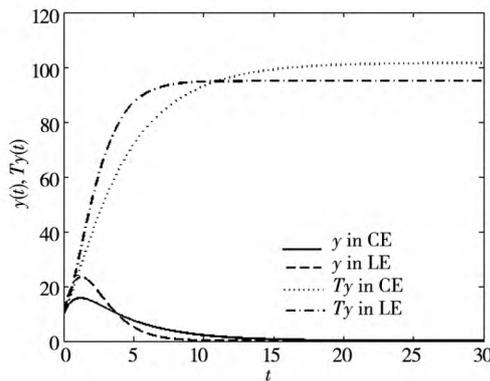


图9 循环经济产业系统排放状态与累积比较

Fig. 9 Comparison of state and accumulation curves in discharging compartment

图6和图7表明,虽然在开始的一两年内生产和消费过程的差异不明显,但随着时间的推移,资源循环利用使生产和消费得到更多(加倍)的物质支持,累积数量出现了很大差异.由图8可以看到,循环经济产业系统生态功能的改造提高了废旧物品再利用的能力,增加了生产和消费资源物质的保障.此外,图8中线性经济(LE)的 x_3 和 TM_3 表示的只是潜在可以再利用的物质质量,实际上这些物质质量没有被再利用而直接排入自然环境,这必然对自然环境产生严重干扰.相比之下,如图9所示,无论是每期排出的状态数量还是积累数量,都表明循环经济模式(CE)比线性经济模式(LE)变化更加平坦,这说明实施循环经济可以放宽对环境治理工作的时间和强度.

3.3 循环经济产业系统的结构优化分析

在上述数据基础上,假设政府对本地区经济的旧产品和废弃物的循环产业链进行组织和技术创新或技术更新,使得某一项 $f_{i_0j_0}$ (等价的 $a_{i_0j_0}$)在下一阶段内发生+5%或-5%的变动.由物质质量守恒定律,从分室 i_0 输出的3项物质比例会改变,假定除 j_0 之外的其他分室输出间的比例均不发生变化. $f_{i_0j_0}$ 的变动及其对 CM 的影响结果如表2所示.

表2 组织创新或技术创新的敏感性分析

Table 2 The Influence analysis of technological innovation

变动项	变动情形	变动导致的比例变化	CM	CM变化(%)
f_{12}	+5%	$f_{12} : f_{13} : f_{14} = 9 : 2 : 1$	2.702 8	-0.02
	-5%	$f_{12} : f_{13} : f_{14} = 39 : 14 : 7$	2.704 0	0.02
f_{13}	+5%	$f_{12} : f_{13} : f_{14} = 21 : 8 : 3$	2.742 5	1.45
	-5%	$f_{12} : f_{13} : f_{14} = 119 : 24 : 17$	2.666 0	-1.38
f_{14}	+5%	$f_{12} : f_{13} : f_{14} = 119 : 34 : 27$	2.639 3	-2.37
	-5%	$f_{12} : f_{13} : f_{14} = 133 : 38 : 9$	2.772 7	2.56
f_{21}	+5%	$f_{21} : f_{23} : f_{24} = 27 : 85 : 68$	2.791 7	3.27
	-5%	$f_{21} : f_{23} : f_{24} = 9 : 95 : 76$	2.621 9	-3.02
f_{23}	+5%	$f_{21} : f_{23} : f_{24} = 9 : 55 : 36$	2.761 2	2.14
	-5%	$f_{21} : f_{23} : f_{24} = 11 : 45 : 44$	2.651 1	-1.94
f_{24}	+5%	$f_{21} : f_{23} : f_{24} = 11 : 55 : 54$	2.620 0	-3.09
	-5%	$f_{21} : f_{23} : f_{24} = 13 : 65 : 42$	2.798 8	3.53
f_{31}	+5%	$f_{31} : f_{32} : f_{33} = 55 : 27 : 18$	2.775 8	2.68
	-5%	$f_{31} : f_{32} : f_{33} = 45 : 33 : 22$	2.634 4	-2.55
f_{32}	+5%	$f_{31} : f_{32} : f_{33} = 65 : 49 : 26$	2.674 649 162	-1.06
	-5%	$f_{31} : f_{32} : f_{33} = 15 : 7 : 6$	2.731 440 688	1.04
f_{34}	+5%	$f_{31} : f_{32} : f_{33} = 15 : 9 : 8$	2.633 986 929	-2.57
	-5%	$f_{31} : f_{32} : f_{33} = 85 : 51 : 24$	2.780 749 370	2.86

注: a_{ij} 可由式(1)计算得到,此处从略.

表 2 结果表明,降低 f_{12} f_{32} f_{14} f_{24} 以及 f_{34} 可使循环倍数增大,提高这些系数则可使循环倍数减少. 其中对 f_{24} 的变动又最为敏感,当该系数下降 5% 时,循环倍数增加 3.53%; 当该系数上升 5% 时,循环倍数减少 3.09%. 另一方面,增加 f_{13} f_{21} f_{23} 和 f_{31} 可使循环倍数增加,降低这些系数可使循环倍数降低. 其中对 f_{21} 的变动又最为敏感,当该系数上升 5% 时,循环倍数增加 3.27%; 当该系数下降 5% 时,循环倍数减少 3.02%. 由此可对资源循环利用制定产业政策和技术创新提供决策方向. 为此,政府应当鼓励企业实施清洁生产,倡导社会绿色消费,提高废旧产品再利用,树立环境保护意识;通过降低 f_{14} f_{24} 和 f_{34} ,提高 f_{21} 和 f_{31} ,以提高资源循环倍数 CM ,进而提高资源循环利用效率和环境保护效果.

4 结束语

循环经济的核心是资源循环利用,是通过对旧产品及零部件的再制造而继续使用,对不可再使用的报废产品及废弃物资源化,作为(再生)资

源再投入到生产过程中生产产品,这样既有利于节约和充分利用资源,又有利于保护生态环境.

本文对循环经济产业系统的资源循环利用建立分室模型及其动态方程,定义资源循环倍数和计算公式. 对产品生产过程,产品消费过程,旧产品再利用和废弃物资源化过程的物质循环进行数值模拟,依此验证了物质循环倍数的存在和资源循环的倍数效果. 进而通过改变分室模型动态方程的物质转移系数,优化改进循环经济产业系统结构,以提高资源循环倍数和资源积累数量,减少对环境的排放数量.

本文的研究成果可以用于区域经济,国民经济和产业园区等循环经济示范区建立资源循环利用产业系统模型;也可以通过建立分室模型检测循环经济示范区资源循环利用的效率和减少对环境排放的效果;对现实循环经济产业系统结构进行优化调整和技术创新,最大化资源循环利用效率和最小化对环境的排放量. 本文的分室建模和数值模拟分析表明实施循环经济能够有力地促进形成资源节约和环境友好型经济社会,实现国民经济绿色可持续发展.

参考文献:

- [1] Odum H T. Trophic structure and productivity of silver springs, Florida [J]. *Ecological Monographs*, 1957, 27(1): 55 - 112.
- [2] Odum H T. Energy, ecology and economics [J]. *Ambio*, 1973, 2(6): 220 - 227.
- [3] Odum E P. The strategy of ecosystem development [J]. *Science, New Series*, 1969, 164(3877): 262 - 270.
- [4] Eriksson E. Compartment models and reservoir theory [J]. *Annual of Ecology and Systematics*, 1971, 2: 67 - 84.
- [5] Matis J H, Wehrly T E, Ellis W C. Compartment Analysis of Ecosystem Models [M]. International Co-Operative House, Fairland, Maryland, 1979.
- [6] Nicolette Meshkat, Seth Sullivant. Identifiable reparametrizations of linear compartment models [J]. *Journal of Symbolic Computation*, 2014, 63: 46 - 67.
- [7] 张文贵. 生物线性分室模型在结构意义下可完全控制型的判定方法 [J]. *数值计算与计算机应用*, 1980, (4): 233 - 238.
Zhang Wengui. A critical method of completely control ability on biological linear compartmental model in a structural sense [J]. *Journal on Numerical Methods and Computer Applications*, 1980, (4): 233 - 238. (in Chinese)
- [8] 刘铁斌, 韩纯儒. 农业生态系统物质循环的分室模型 [J]. *生态与农业环境学报*, 1988, (4): 52 - 58.
Liu Tiebin, Han Chunru. A compartment model of nutrient cycling in agro-ecosystem [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 1988, (4): 52 - 58. (in Chinese)
- [9] 孔鹏志, 杨忠直. 中国经济—环境系统的物质代谢分析 [J]. *经济与管理研究*, 2010, (10): 41 - 47.
Kong Pengzhi, Yang Zhongzhi. The analysis on material metabolism of Chinese environment-economy system [J]. *Research on Economics and Management*, 2010, (10): 41 - 47. (in Chinese)
- [10] 王 昫, 宋乃平, 等. 基于分室模型的农牧复合系统稳定性研究 [J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(3):

1-6.

Wang Xu, Song Naiping, et al. The compartment model of farming and pastoral ecosystem and its stability [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2014, 35(3): 1-6. (in Chinese)

The compartment model and simulation for the industrial system of circulatory economy

YANG Zhong-zhi¹, KONG Peng-zhi², LI Bo-ying¹

1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200052, China;

2. Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China

Abstract: This paper describes an industrial structure of a circulatory economy and builds a systematic dynamic model and its equation system for resources recycling utilization based on Compartment Model Theory. A circulation multiplier and its computational formula are defined to measure the efficiency of resources recycling utilization. The simulated results indicate that the resources recycling utilization can not only realize the amount accumulation of natural resources and improve the resources recycling efficiency, but can minimize discharges into the natural environment by using industrial innovation to adjust each compartment parameter in the circulatory economy. The compartmental model and simulations of the circulatory economy can be used to test or inspect the efficiency of material accumulation and the effects of environment discharges in resources recycling utilization in real economic systems like national economy, regional economy, industrial eco-parks, and so forth.

Key words: circulatory economy; resources recycling utilization; compartment model; circulation multiplier

(上接第 44 页)

node load and node capacity, are expressed by parameters α, β, σ , etc. The redistribution strategies of failure loads corresponding to the condition of existing edge flow constraints are presented. Through giant component functions, the valid nodes still with function could be judged when the redistribution is finished. Furthermore, the time-varied state equations are constructed based on one to one interdependent relationship between the cyber-layer network and physical-layer network, which can depict the dynamic propagation throughout the interdependent supply chain network. Finally, numerical simulations including two cases: single node removal and multi-node removal, are given and the robustness of interdependent supply chain networks with different parameters is compared. In particular, multi-node removals are classified in three ways, i. e., degree ascending, degree descending, and random degree. The simulation results show that the multi-node removal in the ascending degree way leads to the worst robustness performance among the three removal ways, if $\beta = 0.5, 1, 1.5, 2$. Meanwhile, the first phase transition of the cascading failure for interdependent supply chain networks, after multi-node removal, is more obvious than for isolate layer networks, i. e., a small fraction of nodes removal will result in the crash of the whole interdependent supply chain network.

Key words: interdependent supply chain network; cascading failure; robustness; node removal