

信息技术应用

城市能源代谢系统的协同演化研究

穆献中, 朱雪婷*

(北京工业大学循环经济研究院, 北京 100124)

摘要:针对城市能源代谢的累积流转效应和结构协同演化特征,构建基于生态网络的城市能源代谢系统模型,运用可达矩阵对城市能源活动中能源的累积流转效应进行了描述和测算。在此基础上,进一步对城市能源代谢系统中影响协同演化的关键性因素进行识别,基于哈肯模型对城市能源代谢路径中的支配要素序列进行计算。最后选取北京市进行实证检验,结果表明,煤炭在第一、二产业中的使用强度以及天然气在第二产业中的使用强度是影响北京市能源代谢系统有序演进的关键要素,其中煤炭在第二产业中的使用强度是序参量,在北京市能源代谢系统协同演化过程中起主导作用。

关键词:城市能源代谢系统;累积流转效应;协同演化;哈肯模型

中图分类号:F29

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)12-0204-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.12.047

Study on synergistic evolution of urban energy metabolism system

MU Xian-zhong, ZHU Xue-ting*

(Institute of Recycling Economy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In view of the accumulative circulation effect and structural synergistic evolution of energy metabolism in cities, a model for urban energy metabolism system is established based on ecological network. The accumulative circulation effect of energy in urban energy activities is described and measured by using reachable matrix. On this basis, the key factors in urban energy metabolism system that influence the synergistic evolution are further identified and the dominant elements in urban energy metabolism path are calculated based on Haken's model. Finally, the empirical test is carried out in Beijing. The results show that the use intensity of coal in the primary and secondary industries and the use intensity of natural gas in the secondary industry are the key factors affecting the orderly evolution of the energy metabolism system in Beijing. Among these factors, the use intensity of coal in the secondary industry is an order parameter and plays a leading role in the synergistic evolution of the energy metabolism system in Beijing.

Key words: urban energy metabolism system; accumulative circulation effect; synergistic evolution; Harken model

随着城市化进程不断推进,能源已经成为制约城市经济发展和社会建设的关键因素。一直以来,对于城市能源的研究关注于将能源作为经济活动要素投入的供需分析^[1-3]、绩效研究^[4-5]以及基于“经济-环境”2种视角的城市能源结构功能优化^[6-9]等,这些研究一方面倾向于将城市能源系统视为“黑箱”,仅关注系统整体的投入和产出而并不进行系统内部结构和机理的分析,另一方面侧重于描述能源结构的静态特征,评测特定情境下城市能源经济运行状态和未来走势。这些研究推动了城市能源系统研究的发展,但对于揭示城市能源系统运行机理略显不足,主要原因在于城市能源系统内包含了庞大的要素群以及复杂的要素关联,是典型的复杂系统。因此,一些学者尝试运用复杂系统理论对城市能源系统结构进行探究^[10-11]。目前,城市能源系统分析难点之一在于城市能源代谢过程中存在隐含

能流和累积产出的度量问题。针对这一问题,本文中的贡献体现在2个方面,一是构建能够反映城市能源隐含回流城市能源代谢系统,二是对城市能源代谢系统中的协同关系进行度量。

其中,基于生态网络分析的城市代谢研究对于解释城市内生结构运作机理、量化分析能源绩效提供了较好的方法支撑,该方法来源于 Leontief 提出的经济系统投入产出网络分析^[12],由 Hannon^[13]改进并应用于生态系统。生态网络分析适用于系统内部的关联和反馈分析,对多要素、多层次的复杂网络系统具有较强的针对性,尤其适用于存在隐含流的网络分析。因此该方法在社会经济系统,尤其是城市能源代谢系统方面取得了广泛的应用^[14-16]。然而该方法没有解决的问题是在城市经济-能源代谢系统远离平衡态情境下,系统内部的协同演化过程。针对这一问题,考虑到城市能源代谢系统自身的复

收稿日期:2018-05-10;修回日期:2018-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(71273021,71673017)

作者简介:穆献中(1966-),男,博士,教授,研究方向为能源经济、城市经济、技术经济;朱雪婷(1993-),女,硕士生,研究方向为能源经济、城市经济,通讯联系人,1274756438@qq.com。

杂特性,本文中认为基于协同理论和哈肯模型的分析思路具有较好的针对性。因此,本文中尝试将这一分析框架应用到城市能源代谢协同演化机制的研究中,探究其形成过程和运行规律。

1 模型及框架设计

本文中涉及 2 方面的研究内容,一是构建城市能源代谢的生态网络模型,以描述城市能源代谢过程中的隐含回流;二是基于哈肯模型识别和测度城市能源代谢网络中的支配路径。

1.1 城市能源代谢的生态网络模型

生态网络模型能够反映城市能源活动过程中的基础代谢以及各部门间的能量流动关系,按照城市活动的实际流动关系,绘制简化的城市能源代谢系统的概念模型(图 1)。

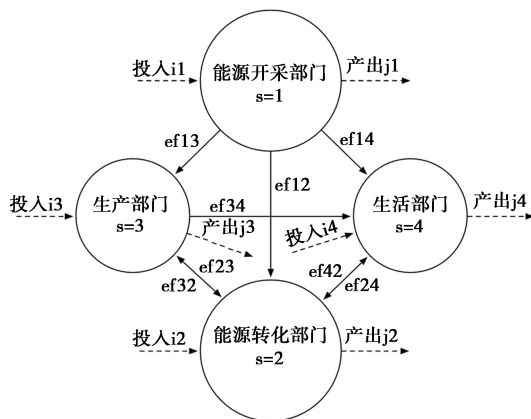


图 1 城市能源代谢系统概念模型

在城市能源实际代谢过程中,按照能源“开采-转化-消费”代谢过程,将系统抽象为 4 部门能源供需模型,包括能源开采部门(s1)、能源转化部门(s2)以及生产(s3)和生活(s4)部门 4 个模块,每个部门通过能源的供需结构形成一定的依存关系,且每个部门包含多门类的子部门,同一部门内的子部门间相互独立,但不同部门的子部门间存在能量流动关系。

在该模型中,投入 i 代表从外部环境流入到各部门的投入,产出 j 代表各部门的产出, ef_{ms} 代表由部门 m 流向部门 n 的能量流。 s_1 代表能源开采部门,在整个环节中扮演着能源生产者的角色,是整个城市能源代谢系统的源点,其能源流出主要为一级能源; s_2 代表能源转化部门,职能包含 2 个方面,一是将由能源开采部门流出的一级能源转化为二级能源供生产部门和生活部门消费,二是将由生产部门和生活部门产生的废能转化为能源再次流入生产部门和生活部门; s_3 和 s_4 分别代表生产部门和生活部门,

是整个城市系统的能源消费终端。其中,各部门的能量总流入 Ti_s 和各部门的能量总流出 To_s 分别满足:

$$Ti_s = i_s + \sum_{m=1}^n ef_{ms}$$

$$To_s = j_s + \sum_{n=1}^n ef_{sn}$$

在城市能源代谢的生态网络分析中,通过量化网络流,能够反映出网络内节点间的输入、输出以及流转关系。由于网络中存在双向流动的能量流,即城市能源代谢网络中存在能量回收利用的情况,因此需要考量网络中能流的累积效应。为便于计算,首先将能流矩阵(ef_{mn})做无量纲化处理得到无量纲矩阵 $G=(g_{mn})$,其中, $g_{mn}=ef_{mn}/T_n$ 。

注意到城市能源代谢网络中尽管大多数路径为单向简单路径,但存在部分节点间路径为双向的以及多条单向路径形成环圈路径(Circle),即城市能源代谢网络中的隐藏流。环圈路径的存在导致在每一轮的城市能源代谢过程中,都有一部分的隐藏能流回流到能源网络中,并在下一轮的代谢过程中重复产生经济、环境收益,从而形成累计,例如电力等二次能源回流到一次能源部门、余热的重复使用、秸秆发电等。因此除了对单项路径进行计量外,还需对这一过程的累积效应进行计量。

累积矩阵 N 表示为:

$$N = (n_{ij}) = G^0 + G^1 + G^2 + \dots + G^m = (I - G)^{-1}$$

其中, $G^0=I$ 为单位矩阵; G^m 表示矩阵 G 累积 m 次步长的可达矩阵; G^0 的含义为由自身流向自身的流矩阵; G^1 为网络内节点间存在 1 次流动关系的直接流矩阵;依此类推, G^m 为经 m 次流动到达的间接流矩阵。可以看出,可达矩阵能够反映出系统内要素间的累积能流;矩阵 N 反映了节点间累计效应,可通过列昂惕夫逆矩阵计算获得。

1.2 城市能源代谢的协同演化要素识别

通过构建城市能源代谢的生态网络模型可得到当前网络中的能流累积效应矩阵,但仍存在 2 个问题:一是该矩阵是静态的,不能反映城市能源代谢系统的变化趋势;二是该矩阵不能识别城市能源代谢过程中要素间的协同关系和关键影响要素。因此本文中在基于城市能源代谢生态网络分析得出的能流累积矩阵的基础上引入了哈肯模型解决这一问题。

哈肯模型的思想是将系统中变量区分为快、慢 2 类,通过计算系统中快变量和线性失稳点,得出系统的序参量方程与演化方程,从而分析系统的协同演化过程。哈肯模型如下:

$$q_1 = -\lambda_1 q_1 - a q_1 q_2$$

$$q_2 = -\lambda_2 q_2 + b q_1^2$$

其中, q_1 和 q_2 为状态变量, $a, b, \lambda_1, \lambda_2$ 为控制变量, λ_1, λ_2 表示阻尼系数, a, b 反映 q_1 与 q_2 的相互作用强度。设 $|\lambda_2| > |\lambda_1|$, 即 λ_2 为衰减迅速的快变量, 运用绝热消去法得:

$$q_2 \approx (b/\lambda_2) q_1^2$$

$$\dot{q}_1 = -\lambda_1 q_1 - (ab/\lambda_2) q_1^3$$

解得 q_2 随 q_1 变化而变化, 因此 q_1 为系统序参量, 即 q_1 支配系统的协同演化过程。

开放条件下, 系统呈现多种动态演化行为。

(1) a 反映 q_2 对 q_1 的协同影响, 当其为负, q_2 对 q_1 起推动作用, 且绝对值越大推力越大; 反之亦然。

(2) b 反映 q_1 对 q_2 的协同影响, 当其为正, q_1 对 q_2 起推动作用, 且绝对值越大推力越大; 反之亦然。

(3) λ_1 反映 q_1 对系统的支配程度, 当其为负, q_1 对系统的有序演化具有正向反馈, 且绝对值越大, 有序性越高; 当其为正, 对系统的有序演化具有负向反馈, 且绝对值越大, 无序性越高。

(4) λ_2 反映 q_2 对系统的支配程度, 当其为负, q_2 对系统的有序演化具有正向反馈, 且绝对值越大, 有序性越高; 当其为正, 对系统的有序演化具有负向反馈, 且绝对值越大, 无序性越高。

需要注意的是, 将上文计算的城市能源代谢的能流累积矩阵 N 进行哈肯模型计算时应首先做如下处理。

(1) 求能流累积矩阵 N 的时间序列矩阵

因为矩阵 N 为独立时间点上的能流累积矩阵, 不能够反映能源代谢系统的演化趋势, 因此需首先将矩阵 N 扩充为连续的时间序列矩阵 $\{N_1, N_2, N_3, \dots, N_t\}$ 。

(2) 简化矩阵, 将矩阵转化为关键因素矩阵

为便于计算, 可将矩阵中不满足以下条件的要素删除:

$$d_{ijk} / (\sum_{i=1}^m d_{ijk}) < 1$$

$$D_k = (d_{ijk}) = N_{k+1} - N_k, k \in [1, t)$$

保留满足条件次数 $\geq 80\%$ 的要素。

(3) 将哈肯模型离散化

由于能流的累积矩阵是离散的, 为便于计算, 将哈肯模型离散化:

$$q_1(k+1) = (1 - \lambda_1) q_1(k) - a q_1(k) q_2(k)$$

$$q_2(k+1) = (1 - \lambda_2) q_2(k) + b q_1^2(k)$$

2 北京市能源代谢系统协同演化的实证检验

北京市能源清洁化发展正在全面推行, 从机动车限行到发电实现“无煤”化意味着北京市能源代谢系统也发生了重大的变化。为探究新背景下北京

市能源代谢系统协同演化机制, 本文中选取北京市 2010—2015 年城市数据进行实证分析。

按照北京市统计年鉴数据分类, 绘制北京市能源代谢的生态网络模型(图 2)。

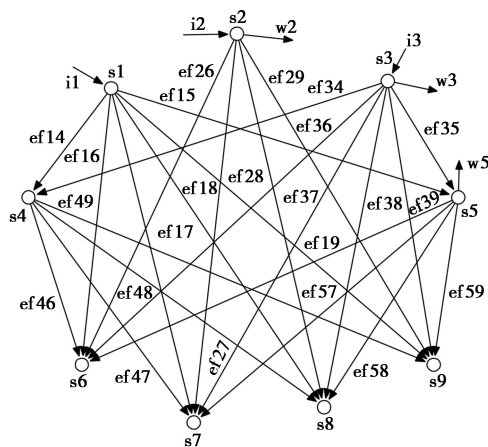


图 2 北京市能源代谢系统图

模型中按照一级能源、二级能源以及终端消费对系统内要素进行了区分和归类, 同时将要素间的能量流向进行了标识。其中, s_1, s_2, s_3 为一级能源部门, s_1 为原煤及煤制品, s_2 为石油及石油制品, s_3 为天然气; s_4, s_5 为二级能源部门, s_4 为热力部门, s_5 为电力部门; s_6, s_7, s_8, s_9 为终端消费部门, s_6 为第一产业, s_7 为第二产业, s_8 为第三产业, s_9 为消费部门。

具体计算过程为: 首先对北京市 2011—2015 年的能量流动数据进行无量纲化, 在此基础上求得累积可达矩阵 $N_{2011} \sim N_{2015}$, 并进一步统计满足精简条件的要素序列, 即:

$$D_1 = \{d_{17}, d_{27}, d_{37}, d_{48}, d_{58}\}$$

$$D_2 = \{d_{17}, d_{37}, d_{57}, d_{28}, d_{29}, d_{39}, d_{49}, d_{57}\}$$

$$D_3 = \{d_{15}, d_{16}, d_{17}, d_{19}\}$$

$$D_4 = \{d_{14}, d_{17}, d_{24}, d_{26}, d_{27}, d_{37}, d_{38}\}$$

$$D_5 = \{d_{14}, d_{16}, d_{19}, d_{29}\}$$

保留满足条件 $\geq 80\%$ 的要素, 即 $\{d_{17}, d_{37}\}$ 。

因此, 精简后的北京市能源代谢生态网络中累积能流矩阵的关键流为 $\{n_{17}, n_{37}\}$, 含义为第二产业中煤产品的累积能源流转和第二产业中天然气的累积能源流转是关系北京市能源代谢的关键要素。将能源累积流转矩阵中这 2 个关键流的时间序列抽取出来带入哈肯模型中计算其对北京市能源代谢的协同演化效应。

设 n_{17} 为序参量 q_1 , n_{37} 为 q_2 , 利用 Matlab Curve Fitting Tool 得到煤产品和天然气分别在第二产业中的累积能源流转的动态演化方程:

$$\hat{n}_{17} = 1.635n_{17} - 7.6n_{17}n_{37}; SSE = 0.009,$$

$$R^2 = 0.7 = 7.438, \text{Adjusted } R^2 = 0.7251$$

$$\hat{n}_{37} = 0.0793n_{37} + 0.1173n_{17}^2; SSE = 0.0025,$$

$$R^2 = 0.8247, \text{Adjusted } R^2 = 0.8663$$

可知拟合效果良好,能够反映出煤产品在第二产业中的累积能量流转对于北京市能源代谢系统的主导作用。同时,由 n_{17} 和 n_{37} 的分析可知, $a=7.6$, $b=0.1173$, $\lambda_1=-1.635$, $\lambda_2=-0.0793$, $a>0$, $b<0$, $|a| \gg |b|$ 且 $|\lambda_1| \gg |\lambda_2|$,证明 n_{17} 是阻尼较小变化缓慢的序参量,而 n_{37} 则是快变量。

在北京市能源代谢生态网络中累积能流矩阵关键流 $\{n_{17}, n_{37}\}$ 的比较分析中,煤在第二产业中的累积能源流转 n_{17} 是北京市能源代谢系统的序参量,而天然气在二产中累积流转是快变量。因此控制第二产业中煤的使用强度是北京市能源代谢协同演化的关键。

在关键流的协同演化分析中, λ_1 已经反映出煤在二产中的使用强度已经在北京市能源代谢系统有序演化过程中形成了十分稳定的正反馈机制,这意味着发电“无煤”化以及新能源替代等措施对于改善北京市能源系统,推动北京市能源代谢系统有序演进具有十分重要的作用。另一方面,通过关键流哈肯模型计算结果的间接传递分析,认为天然气在第二产业中的累积流转对于推动北京市能源代谢系统的有序演进同样具有正反馈作用。同时,通过分析 n_{17} 和 n_{37} 的计算结果, $a>0$, $b<0$,反映出二者间存在抑制关系,也与天然气与煤在第二产业中的替代竞争关系相符合, $|a|>|b|$ 的比较结果也表现出改善第二产业中煤的使用强度对于推进以天然气为代表的清洁能源具有促进作用。

3 结论

对城市能源系统演化机制进行研究,首先构建了基于生态网络分析的城市能源代谢系统的概念模型,运用可达矩阵将城市能源流转过程中能源流的累积效应进行计算,然后采用哈肯模型对城市能源代谢系统中协同演化集中的关键参量识别和分析,并选取北京市进行实证研究。形成主要结论概括为以下几点。

(1)城市能源代谢系统的核心是能源累积流转效应

能源累积流转是城市代谢系统显著特征,单次计量能流分析不能准确地反映城市能源代谢过程中的基本特征。针对这一问题,运用生态网络分析中的可达矩阵工具对城市能源代谢系统中累积能源流转进行了测度,实证结果验证了该方法具备可行性。

(2)城市代谢系统的协同演化取决于能流累积流转的变化态势

城市代谢系统的协同演化是多部门、多能流共同作用的结果,但其中部分能流是推动这一过程发生的主导因素,基于生态网络分析的能源累积流转矩阵在时间维度上的变化趋势能够简化出关键性的要素矩阵,运用哈肯模型对其进行分析能够识别出关键性的能流,即推动城市能源代谢系统协同演化的序参量。

(3)煤炭在第二产业中的使用强度是北京市能源代谢系统的序参量

实证分析结果表明,北京市能源代谢系统有序演进的关键是煤炭和天然气在第二产业的使用强度。煤炭在第二产业的使用强度是序参量,天然气在第二产业中的使用强度虽然不是序参量,但对于北京市能源代谢系统协同演化仍具有较强的推动作用,需处理好在这一过程中天然气与煤炭的替代关系。

参考文献

- [1] 张欢,成金华,王来峰.中国工业化进程与能源矿产供需均衡的研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(3):165-170.
- [2] 王启洋,任荣明.对外直接投资与我国外部能源供给的相关性研究[J].科技管理研究,2014,34(2):233-236.
- [3] 林卫斌,谢丽娜,苏剑.城镇化进程中的生活能源需求分析[J].北京师范大学学报:社会科学版,2014,(5):122-129.
- [4] 范丹,王维国.基于低碳经济的中国工业能源绩效及驱动因素分析[J].资源科学,2013,(9):1790-1800.
- [5] 汪克亮,杨力,杨宝臣,等.能源经济效率、能源环境绩效与区域经济增长[J].管理科学,2013,(3):86-99.
- [6] 马丽梅,张晓.中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响[J].中国工业经济,2014,(4):19-31.
- [7] 吴江,孙彤,石磊.基于偏离份额法的河北省能源终端消费结构研究[J].资源科学,2013,(1):109-114.
- [8] 范德成,王韶华,张伟.低碳经济目标下一次能源消费结构影响因素分析[J].资源科学,2012,(4):696-703.
- [9] 林伯强,姚昕,刘希颖.节能和碳排放约束下的中国能源结构战略调整[J].中国社会科学,2010,(1):58-71,222.
- [10] 周明,梁培培,石风光.区域生态工业系统演化数值模拟[J].系统工程理论与实践,2011,31(5):970-975.
- [11] 崔立志.能源、经济和环境复合系统演化路径实证分析[J].软科学,2013,27(7):37-41.
- [12] Leontief W W. Input-output economics [M]. New York: Oxford University Press, 1966.
- [13] Hannon B. The structure of ecosystems [J]. J Theor Biol, 1973, 41(3):535-546.
- [14] Bailey R, Bras B, Allen JK. Measuring material cycling in industrial systems [J]. Resour Conserv Recy, 2008, 52(4):643-652.
- [15] Zhang Y, Zheng H, Yang Z, et al. Urban energy flow processes in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration: Combining multi-regional input-output tables with ecological network analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 114:243-256.
- [16] Zhang Y, Li Y, Zheng H. Ecological network analysis of energy metabolism in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration [J]. Ecological Modelling, 2017, 351:51-62. ■