

Energy Metabolism Network Based on Ecological Network Analysis: A Case Study of Shandong Province

Shishang Zheng, Lei Shi*

SEPA Key Laboratory on Eco-Industry, School of Environment, Tsinghua University, Beijing
Email: zss13@mails.tsinghua.edu.cn, *slone@tsinghua.edu.cn

Received: Nov. 28th, 2016; accepted: Dec. 16th, 2016; published: Dec. 20th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Energy metabolism plays a great role in regional socio-economic development. This paper analyzed the energy metabolism of Shandong Province by ecological network analysis. The overall energy metabolism network of 2000, 2005, 2010 and 2014 of Shandong Province was firstly constructed. Then flow analysis and utility analysis indicators were conducted to investigate its structure and functions. Results show that the energy metabolism network of Shandong Province is dominated rather by competition and control relationships than by symbiotic relationship. The pathways between different components are more diverse, and the number of metabolic pathways and connectivity constantly improve over time, while the network becomes a highly competitive and predatory metabolic symbiont.

Keywords

Ecological Network, Energy Metabolism, Shandong Province, Utility Analysis, Flow Analysis

基于生态网络的山东省能源代谢网络分析

郑诗赏, 石磊*

清华大学环境学院, 国家环境保护生态工业重点实验室, 北京
Email: zss13@mails.tsinghua.edu.cn, *slone@tsinghua.edu.cn

*通讯作者。

文章引用: 郑诗赏, 石磊. 基于生态网络的山东省能源代谢网络分析[J]. 环境保护前沿, 2016, 6(6): 159-170.
<http://dx.doi.org/10.12677/aep.2016.66020>

收稿日期: 2016年11月28日; 录用日期: 2016年12月16日; 发布日期: 2016年12月20日

摘要

能源代谢对区域经济社会发展具有重要作用和影响力。本文采用生态网络分析方法对山东省能源代谢进行了分析。我们首先构造了2000、2005、2010和2014年山东省整体能源代谢网络, 然后对其进行了流量分析和效用分析, 探讨了能源代谢网络的系统结构及功能关系。结果表明: 山东省能源代谢系统是一个由竞争关系以及控制关系所主导的系统, 各节点之间的共生关系较少; 随着时间推移, 各组间的作用途径也更为多样, 代谢路径数量和连通性不断提高, 是一个具有高度竞争和掠夺性的代谢共生体。

关键词

生态网络, 能源代谢, 山东省, 效用分析, 流量分析

1. 引言

区域经济日益成为一个以城市为节点的嵌套发展系统。作为节点的城市, 其规模在扩大, 其代谢在复杂化; 城市规模和代谢模式的变化不仅使得单个城市产生了开发边界与最佳规模的问题, 而且使得城市间的作用距离与交互模式也成为焦点问题。城市间的相互影响在加强, 这种影响是多方面的, 不仅是经济的, 而且是生态的, 环境的; 城市代谢, 在内部还是外部都趋于复杂化, 代谢也是多维的, 而能量代谢和物质代谢是探究其相互影响的关键。

Taylor P.J. [1] [2] [3]开展了一系列关于世界城市代谢及关联网络的基础性、前瞻性研究, 展示了诸多城市网络领域内的理论与方法, 并在全球范围内开展了大量案例研究。刘华军[4]基于1995~2012年的中国省际能源消费数据, 利用社会网络分析方法对能源消费空间关联的网络结构特征及其效应进行了经验考察; 姜巍[5]以2007年的中国投入产出表为基础, 运用威弗综合指数法构建了中国产业部门之间的联系网络, 并对以煤炭开采和洗选业为主的5个主要能源产业的网络特征进行了分析。李响[6]提出长三角城市间已互动形成紧密的网络状关联, 但网络内各城市结点间中心性不均衡、枢纽型城市较少, 区域多中心、网络化协同发展格局显现, 最后提出了长三角城市群区域网络功能提升及治理的相关建议。孟德友[7]指出河南各城市经济联系总量等级特征明显, 地市间经济联系初步形成了“十”字形主轴的网络化发展空间结构。

生态网络分析来源于投入产出分析法在生态系统物质、能量流动分析中的应用, 是一种基于矩阵运算原理, 对生态系统中物质、能量流动进行模拟的分析方法[8], 最初被称为生态系统流分析[9]。1976年, 关于生态网络流分析的论文首次发表[10] [11]。之后, 一般系统理论被进一步应用其中, 尤其是环境也被整合进模型之中, 生态网络分析法被正式提出。Brian D. Fath [12]指出生态网络分析中有效数据必须能描绘出生态系统流量和存量的全景, 并概括出构建生态网络模型的主要步骤和过程, 系统性地总结了网络模型的数学算法和原理, 并且基于构建方法进行不同类型网络模型的互相对比。Brian D. Fath [13]也将生态系统视作演进的复杂系统, 选取合适的模型进行网络分析。Yan Zhang [14] [15]分析了城市能源代谢系统和水代谢系统的生态网络分析, 以北京、上海、天津和重庆四个直辖市为案例对象。刘耕源[16]基于生态热力学流核算方法, 建立了大连市生态网络模型, 通过路径分析探讨了代谢长度与代谢路径数量、连通性的变化关系, 确定了城市代谢系统的基本营养结构, 以及各组间的作用途径, 揭示出固有网络结构中复杂的生态关系。

因此, 将城市作为一个处在众多网络中的节点, 从网络视角进行研究成为当前的一个热点方向。将生态网络分析方法运用到区域经济生态系统, 可分析出系统内部各节点的相互关系, 而这种关系对系统管理和调控具有重要意义。本文就是应用生态网络分析方法对山东省能源代谢系统进行探究式分析, 以期根据计算分析结果对山东省能源代谢结构及相关规划管理提出针对性举措与建议。

2. 方法与指标

2.1. 模型建立

生态网络中的路径是指连接两个节点(分室)的有向线, 也称为流动路径, 是分室内物质、能量传递的通道。任意两个网络节点 i 和节点 j 之间的流动结构可以用图 1 表示。其中, f_{ji} 为节点 i 到 j 的流, z_i 、 y_i 分别为节点 i 与外部区域间的输入流和输出流。根据全生命周期的能源代谢过程, 能源代谢结构可分为能源生产、能源转换、能源消费和能源回收四部分。

用生态网络构建能源代谢网络结构, 网络节点为 19 个, 网络关系(即边)为能源流动。网络模型中各节点分别为: 1. (一次)能源生产; 2. 火力发电; 3. 供热; 4. 洗选煤; 5. 炼焦; 6. 炼油; 7. 制气; 8. 煤制品加工; 9. 农林牧渔业; 10. 工业; 11. 建筑业; 12. 交通运输、仓储及邮电通迅业; 13. 批发和零售贸易业、餐饮业; 14. 生活消费; 15. 其他(消费); 16. 回收能; 17. 能源库存; 18. 外省(区、市)调入调出系统; 19. 进出口系统。

需要特别指出的是, 本文所建立之网络模型与相关既有研究存在两处不同:

1) 网络构建上, 本文在传统 17 节点的基础上新增了外省(区、市)调入调出系统和进出口系统两个节点, 便于考量外部环境对系统内部代谢的影响, 用以综合分析和评估能源代谢网络的整体性质;

2) 研究尺度上, 本文将能源代谢的系统边界外延至了省这一尺度, 对于厘清全省能源代谢的结构性质和功能关系具有重要意义, 也便于给政策制定者提供依据。

能源平衡表将各种原供应、加工转换、传输损失以及终端消费的数据集中, 能够直观的反映各种能源每年的流向与平衡关系。本文所用研究之数据皆来源于《山东省统计年鉴》及山东省 2000~2014 各年的能源平衡表, 分行业分品种能源消费量及规模以上工业企业能源购入、生产及消费表, 将实物量按各种能源品种不同的折算标准计量单位系数进行计算, 从而确定能源代谢网络中各节点的通量及节点与节点间的流量数值。

运用生态网络分析方法, 类比自然生态系统中的生产者、初级消费者和次级消费者, 在能源代谢全生命周期和经济社会系统分析基础上, 概化生态网络如下:

- 1) 生产者: 能源开采, 能源回收, 能源库存部门, 外省(区、市)调入调出和进出口系统
- 2) 初级消费者: 能源转换部门, 包括火力发电, 供热, 洗选煤, 炼焦, 炼油, 制气和煤制品加工等环节;

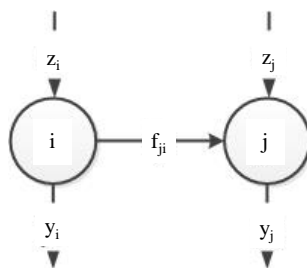


Figure 1. The ecological network model of energy metabolism system [12]

图 1. 能源代谢系统生态网络模型[12]

3) 次级消费者: 工业和家庭生活消费部门, 包括农林牧渔业, 工业, 建筑业, 交通运输、仓储及邮电通讯业, 批发和零售贸易业、餐饮业, 生活消费和其他能源终端消费环节;

根据公布的数据资料表 1, 能源平衡表中 20 种不同种类能源的吨标煤系数为表 2。

2.2. 生态网络分析指标[12] [17]

2.2.1. 基本指标

$$T_{i,\text{in}} = \sum_{j=1}^n f_{ij} + z_i$$

$$T_{i,\text{out}} = \sum_{j=1}^n f_{ji} + y_i$$

式中, f_{ij} ——节点 j 到 i 的流量;

f_{ji} ——节点 i 到 j 的流量;

z_i ——节点输入量;

y_i ——节点输出量。

当系统为稳态时, $T_{i,\text{in}} = T_{i,\text{out}} = T_i$, 基于城市能源代谢系统的稳定性, 实际可获取数据的难易程度以及便于计算考虑, 本研究选用网络节点的总输入量 $T_{i,\text{in}}$ 作为节点的通量 T_i 。系统总流动量

$$\text{TST} = \sum_{i=1}^n T_i$$

构建直接流量矩阵

$$g_{ij} = f_{ij}/T_j$$

2.2.2. 效用分析

本研究采用生态网络中的效用分析来定量解析系统组分之间的生态关系。该分析方法计算得到的效用矩阵能够系统地分析系统之中每个节点之间利用和被利用的效用关系, 进而明确每个节点在系统之中所扮演的角色和作用, 现已广泛运用于不同尺度和类型的经济、社会、产业和生态系统。从而在此基础上可以判断每个节点之间内在的共生、竞争、掠夺和控制等生态关系。

为了表征节点之间的有效直接效用, 在此定义直接效用矩阵 $D = (d_{ij})$, 有

$$d_{ij} = (f_{ij} - f_{ji})/T_i$$

式中, f_{ij} ——节点 j 到 i 的流量;

f_{ji} ——节点 i 到 j 的流量;

T_i ——节点 i 总输入量。

基于上述定义的直接效用矩阵, 在此定义和计算无量纲总效用矩阵

$$U = (u_{ij}) = D^0 + D^1 + D^2 + D^3 + \dots + D^k + \dots + (I - D)^{-1}$$

其中, I 是单位矩阵。网络中节点 1 和节点 2 之间的效用符号用 su_{12} 和 su_{21} 来表示。 su_{12} 表示从节点 2 到节点 1 的效用流, 而 su_{21} 表示从节点 1 到节点 2 的效用流。 $\text{sgn}(U)$ 表示网络中两节点之间的整体关系。通常情况下, 两节点之间的关系存在以下的 9 种情况, 具体如表 3 所示:

如果 $(su_{21}, su_{12}) = (+, -)$, 表示节点 2 掠夺节点 1, 这种关系类似于自然界的捕食关系; 相反, 如果 $(su_{21}, su_{12}) = (-, +)$, 表示节点 2 被节点 1 所控制, 抑或是被掠夺; 如果 $(su_{21}, su_{12}) = (-, -)$, 表示节点 1 和节点 2

Table 1. Pathway and interpretation of ecological network flow matrix
表 1. 生态网络流量矩阵路径及含义

路径	路径	能源种类	路径	路径	能源种类
f21	能源开采→火力发电	X1, X8	f10,6	炼油→工业	X9, X10, X11, X12, X14, X16
f24	洗选煤→火力发电	X2, X3	f10,7	制气→工业	X7
f25	炼焦→火力发电	X6	f10,16	能源回收→工业	X20
f26	炼油→火力发电	X9, X10, X11, X12, X14, X16	f10,17	能源库存→工业	X1, X8
f27	制气→火力发电	X7	f11,2	火力发电→交通	X19
f28	煤制品加工→火力发电	X4	f11,3	供热→交通	X18
f2,16	能源回收→火力发电	X20	f11,6	炼油→交通	X11, X12
f31	能源开采→供热	X1	f11,16	能源回收→交通	X20
f34	洗选煤→供热	X2	f12,2	火力发电→交通运输、仓储及邮电通讯业	X19
f35	炼焦→供热	X6, X17	f12,3	供热→交通运输、仓储及邮电通讯业	X18
f36	炼油→供热	X11, X12, X14, X16	f12,6	炼油→交通运输、仓储及邮电通讯业	X9, X10, X11, X12, X14, X16
f37	制气→供热	X7	f12,16	能源回收→交通运输、仓储及邮电通讯业	X20
f38	煤制品加工→供热	X5	f12,17	能源库→交通运输、仓储及邮电通讯业	X1, X8
f3,16	能源回收→供热	X20	f13,2	火力发电→批发和零售贸易业、餐饮业	X19
f41	能源开采→洗选煤	X1	f13,3	供热→批发和零售贸易业、餐饮业	X18
f51	能源开采→炼焦	X1	f13,6	炼油→批发和零售贸易业、餐饮业	X9, X10, X11, X12, X14, X16
f54	洗选煤→炼焦	X2	f13,16	能源回收→批发和零售贸易业、餐饮业	X20
f58	煤制品加工→炼焦	X4	f14,2	火力发电→生活消费	X19
f5,17	能源库存→炼焦	X12	f14,3	供热→生活消费	X18
f61	能源开采→炼油	X8	f14,5	炼焦→生活消费	X6
f71	能源开采→制气	X1, X8	f14,6	炼油→生活消费	X9, X10, X11, X12, X14, X16
f75	炼焦→制气	X6	f14,16	能源回收→生活消费	X20
f76	炼油→制气	X11, X12	f15,2	火力发电→其他消费	X19
f91	能源开采→农林牧渔业	X1, X8	f15,3	供热→其他消费	X18
f92	火力发电→农林牧渔业	X19	f15,6	炼油→其他消费	X9, X10, X11, X12, X14, X16
f94	洗选煤→农林牧渔业	X2	f15,16	能源回收→其他消费	X20
f96	炼油→农林牧渔业	X11, X12	f16,1	能源开采→能源回收	X1
f10,1	能源开采→工业	X1, X8	f16,10	工业→能源回收	X1
f10,2	火力发电→工业	X19	f17,1	能源开采→能源库	X1
f10,3	供热→工业	X18	f17,4	洗选煤→能源库	X2
f10,4	洗选煤→工业	X2	f17,5	炼焦→能源库	X6
F10,5	炼焦→工业	X6	f17,6	炼油→能源库	X11, X12

Table 2. Coefficient of tce of different kinds of energy
表 2. 不同种类能源吨标煤系数

序号	能源种类	吨标煤系数(Co)	单位
X1	原煤	0.7143	kgce/kg
X2	洗精煤	0.9	kgce/kg
X3	其他洗煤	0.2857	kgce/kg
X4	型煤	0.7	kgce/kg
X5	焦炭	0.9714	kgce/kg
X6	焦炉煤气	5.714	kgce/m ³
X7	其他煤气	3.5701	kgce/m ³
X8	原油	1.4286	kgce/kg
X9	汽油	1.4714	kgce/kg
X10	煤油	1.4714	kgce/kg
X11	柴油	1.4571	kgce/kg
X12	燃料油	1.4286	kgce/kg
X13	液化石油气	1.7143	kgce/kg
X14	炼厂干气	1.5714	kgce/kg
X15	天然气	1.33	kgce/m ³
X16	其他石油制品	1.4	kgce/kg
X17	其他焦化产品	1.5	kgce/kg
X18	热力	0.03412	kgce/10 ⁶ J
X19	电力	3.27	kgce/kwh
X20	其他能源	1	kgce/kg

Table 3. Utility relationship between components of ecological network
表 3. 生态网络效用分析节点关系

sgn(U)	对应关系	sgn(U)	对应关系	sgn(U)	对应关系
(+, +)	互利共生	(-, -)	竞争	(0, 0)	中立
(+, -)	掠夺	(-, +)	控制	(0, +)	无利共生
(+, 0)	偏利共生	(-, 0)	偏害寄生	(0, -)	无害共生

之间存在竞争关系, 导致对双方都有负面效应; 如果 $(su_{21}, su_{12}) = (+, +)$, 那么这两个节点之是共生关系, 两个节点都从共生关系中获得正面效应; 而如果 $(su_{21}, su_{12}) = (0, 0)$, 则表示这两个节点间是中性关系, 相互不产生影响。

一般情况下, 效用矩阵 U 中的正对角线的符号都为正, 这正对应着生态网络中的每个节点都是自我共生的。在上述可能的 9 种关系中, 由于 $su_{ij} = 0$ 的情况通常不会出现在城市能源代谢系统的生态网络之中, 因此中性关系、偏利共生、无利共生、无害寄生和偏害寄生等 5 种关系可以不被考虑, 则节点关系可以简化为掠夺(+, -)、竞争(-, -)、控制(-, +)、共生(+, +) 4 种。此外, 由于任意两个节点间的关系是相互的, 实际对效用矩阵的分析只需要针对其中一半。

基于综合效用矩阵 U , 在此定义指标共生指数(或称效用函数)

$$M = J(U) = \frac{S_+(U)}{S_-(U)}$$

式中, $S_+(U)$ ——效用矩阵 U 中正效用的数量

$S_-(U)$ ——效用矩阵 U 中负效用的数量

共生指数 M (效用函数)可作为网络共生能源系统的一个目标函数。并且当 $J(U) > 1$ 时, 即矩阵的正向符号数量大于负向符号, 则代表系统的整体积极共生性要大于其消极竞争性, 说明该系统内组分间的正效用大于负效用, 为共生系统, M 越大则系统的共生度越高。利用系统共生指数, 可以确定系统整体共生状况, 以便从整体上进行系统关系水平的对比。

3. 结果与讨论

经计算分析, 山东省 2000、2005、2010 和 2014 年的效用矩阵计算结果及类型分别如下列图 2~5 所示。基于以上计算而来的山东省能源代谢网络效用矩阵结果, 由于效用关系的对称和平衡关系, 下列的

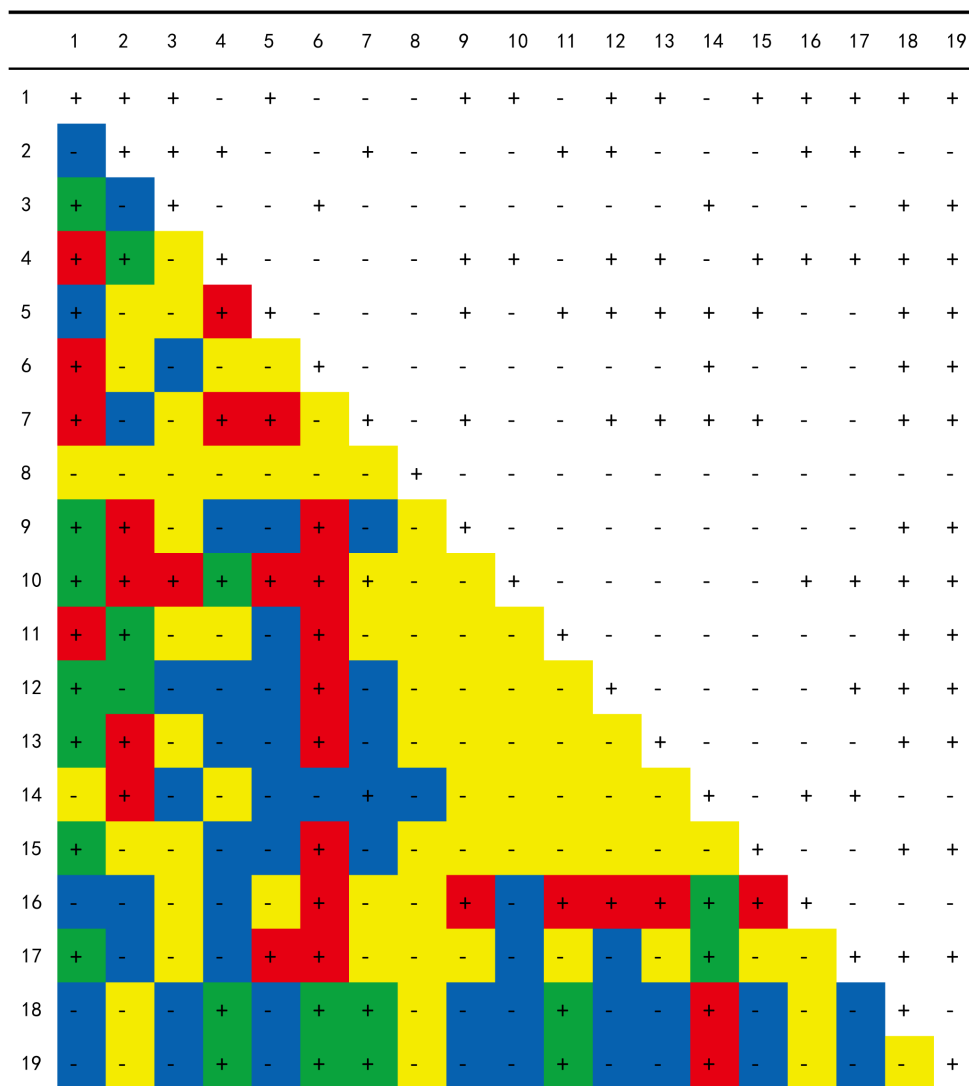


Figure 2. Urban metabolism network utility matrix relationship and type of Shandong Province in 2000
图 2. 2000 年山东省能源网络效用矩阵关系及类型

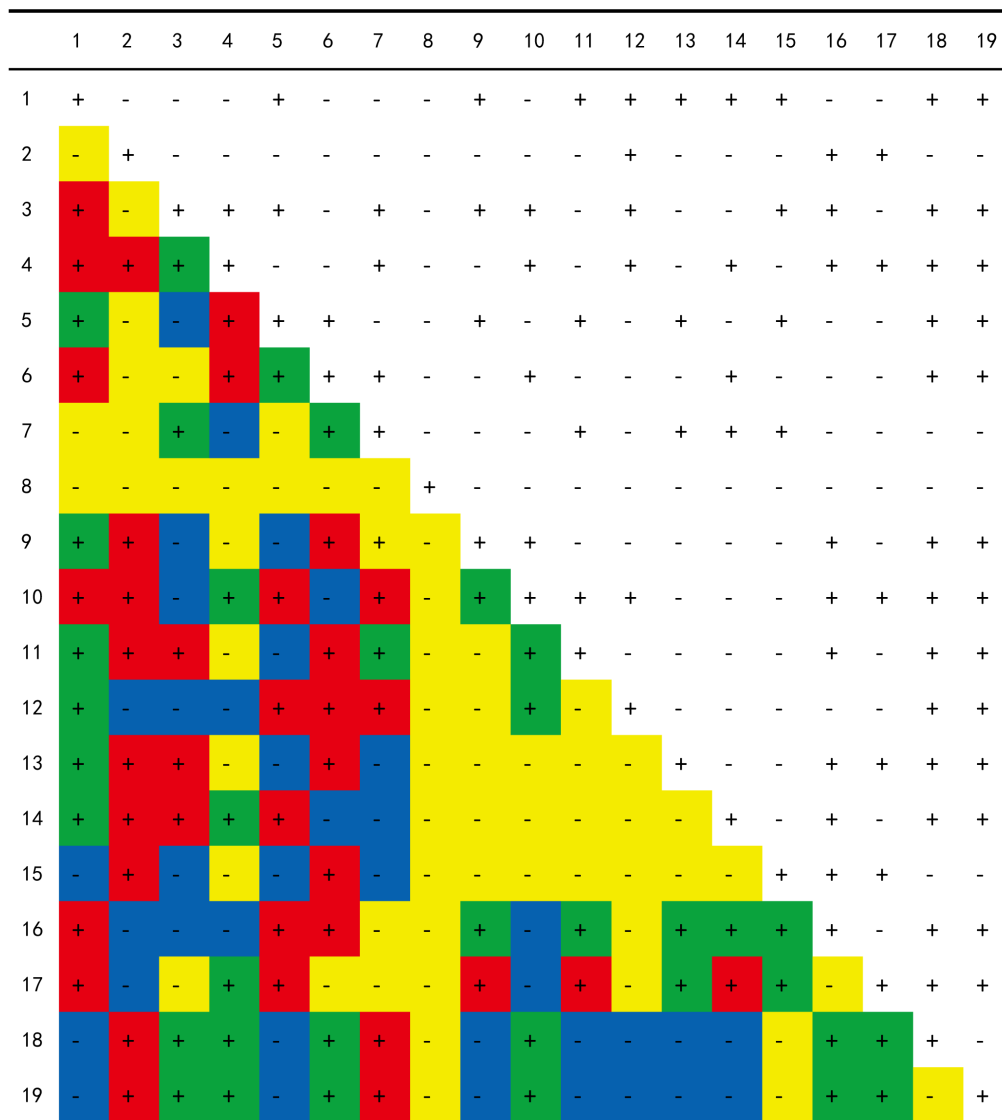


Figure 3. Urban metabolism network utility matrix relationship and type of Shandong Province in 2005
图 3. 2005 年山东省能源网络效用矩阵关系及类型

计算结果和视图分析皆是针对效用关系矩阵的左下部分进行, 结果表示了节点 i 对节点 j 的关系。系统共包含了 171 对关系, 掠夺、竞争、控制和共生四种关系在所有年份都有表现。表中用不同的颜色表示了对应的关系, 其中: ■ 表示掠夺关系, ■ 表示竞争关系, ■ 表示控制关系, ■ 表示共生关系。相应的历年能源网络效用关系类型如下(图 2~5)。

山东省历年效用关系对数及比例变化如表 4 所示。

综合来看, 根据相关计算结果分析可得, 在此可以对山东省能源系统代谢关系的整体表现进行分析和评价:

山东省能源代谢网络系统中共生关系数量占总数量的比率分别为 2000 年的 12.3%, 2005 年的 21.6%, 2010 年的 20.5% 和 2014 年的 20%。共生关系在系统所有的关系中, 占据了 20% 左右比例, 表明网络共生关系在这四年中都并非能源代谢系统的主导关系, 但同时也占据着一定的地位。同时, 从时间变化上看, 共生关系的数量虽然没有明显的年际变化趋势, 但总体上还是发生了十分微小的上升并趋于平稳,

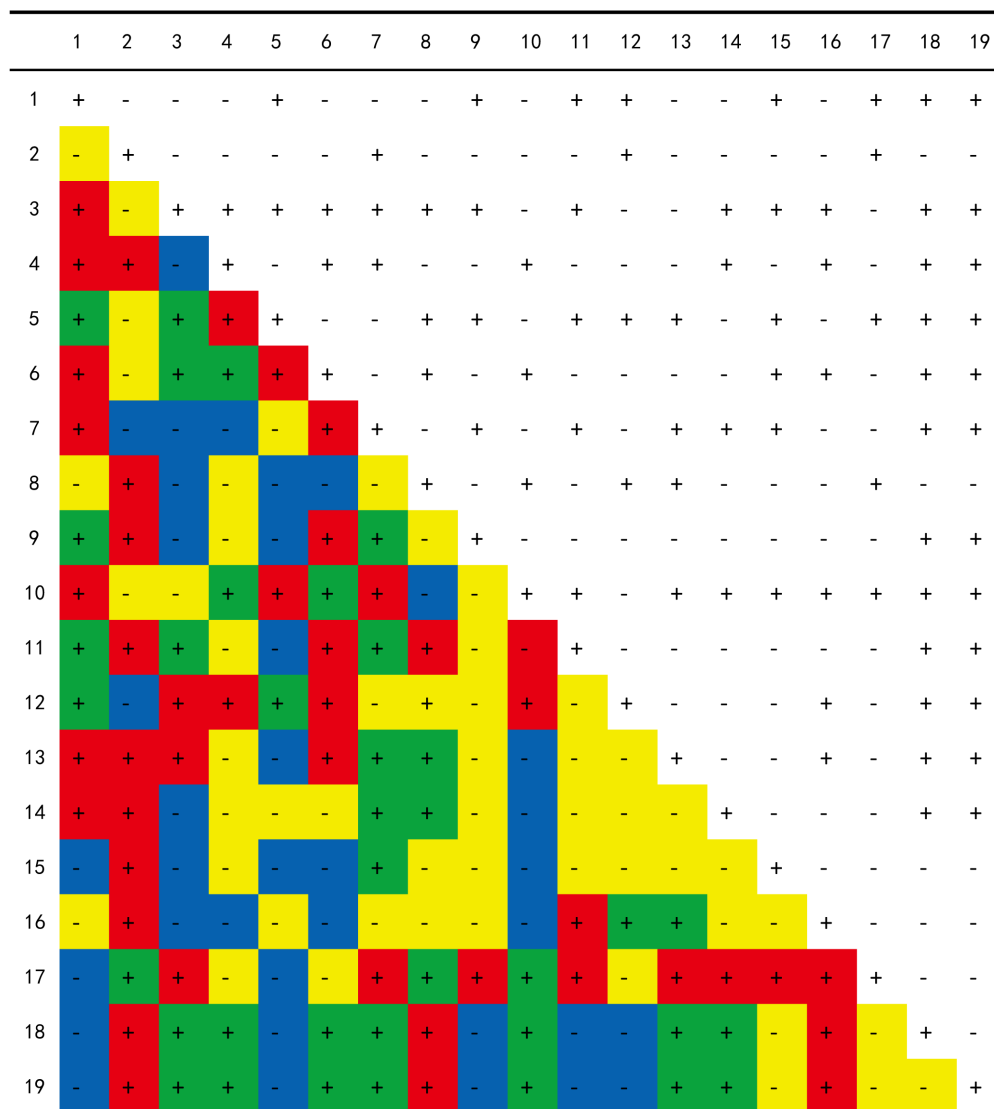


Figure 4. Urban metabolism network utility matrix relationship and type of Shandong Province in 2010
 图 4. 2010 年山东省能源网络效用矩阵关系及类型

由 2000 年的 21 对上升到了 2005 年的 35 对, 2010 年的 37 对和 2014 年的 34 对。该结果说明, 在这段研究区间之内, 能源系统组分间的共生关系正在发生着平稳有序的强化, 对能源系统整体的共生水平产生了相当正面、积极和有利的的影响, 同时由于一对共生关系能为系统贡献两个正效用, 其对系统共生水平的正面影响也会在相当程度上被放大。

竞争关系在系统所有的关系中, 占据了 30%~40% 的比例, 在系统关系中所占的比重整体上要大于共生关系。这说明, 山东省能源代谢系统的内部能源竞争大于能源共享, 能源代谢系统的整体协调性不足。同时, 从时间变化上看, 竞争关系的数量年际变化落差较大, 2000 年 71 对比最少的年份 2010 年的 52 对多了 19 对。从数量变化的总趋势上看, 竞争关系表现出了普遍的减少。这说明山东省能源代谢系统内的能源竞争虽然不可忽视, 但这种能源竞争态势正在进一步弱化, 数量正在减少, 与共生关系的增加一样, 这种变化同时也导致了系统整体共生水平的上升, 并且这种正向的推动作用, 同样被竞争关系带来的两个负效用所缩小。

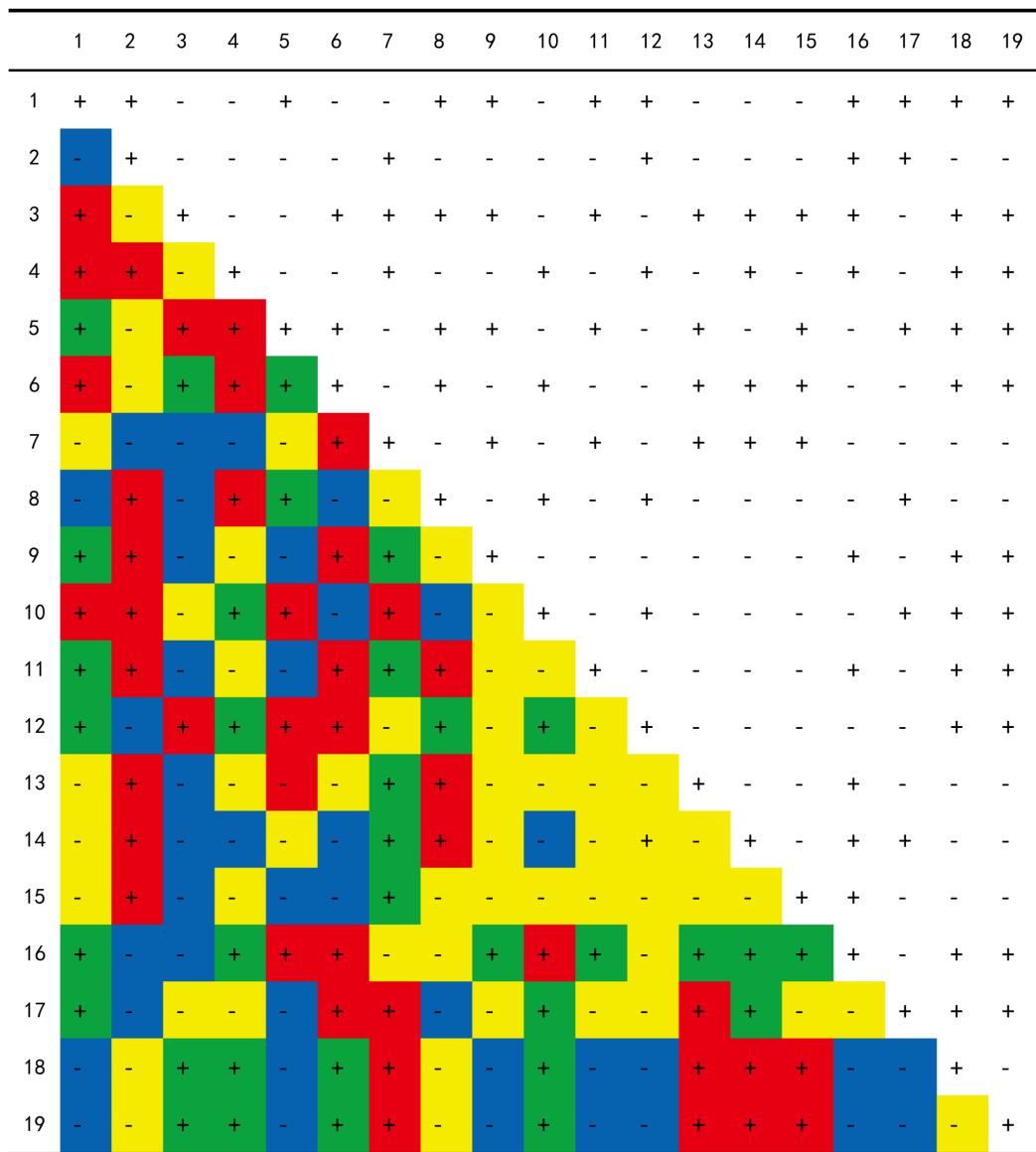


Figure 5. Urban metabolism network utility matrix relationship and type of Shandong Province in 2014
 图 5. 2014 年山东省能源网络效用矩阵关系及类型

Table 4. Utility relationship number and proportion in every year
 表 4. 历年效用关系对数及比例变化

	2000	2005	2010	2014
共生关系对数	21	35	37	34
共生关系比例	0.123	0.216	0.205	0.2
竞争关系对数	71	59	52	54
竞争关系比例	0.415	0.345	0.304	0.316
掠夺和控制关系对数	79	85	84	83
掠夺和控制关系比例	0.462	0.439	0.491	0.485

Table 5. Positive and negative utility of ecological network
表 5. 生态网络正负效用变化

年份	正效用	负效用	共生指数
2000	140	221	0.633
2005	168	193	0.870
2010	177	184	0.962
2014	171	190	0.9

掠夺和控制关系在系统所有的关系中, 占据了 45% 左右的比例, 并且四个年份都保持在 40% 以上, 表明掠夺和控制是系统中的主导关系。掠夺和控制关系的总数在时间节点上的变化幅度不大, 但在总趋势上还是表现出出轻微增加的态势。这说明, 山东省能源代谢系统是一个以组分(分室)间的“捕食”活动为主导的代谢系统, 但这种主导作用正在轻微地向竞争关系转移。同时, 由于这两种关系在正负号方面都表现为一正一负, 从而对系统整体的共生指数的直接影响并不大, 但其在系统中所占比例的多少, 会影响其它关系的比重, 因此仍然对系统共生水平产生一定的影响。

1) 从时间变化上看(表 5), 山东省能源代谢系统的共生指数在这四年中总体是保持增长并且趋于平稳。系统共生指数的最大值出现在 2010 年, 为 0.962, 最小值出现在 2000 年, 为 0.633, 并且数值的变化出现了统一的上升趋稳态势, 没有出现明显且有规律性的振荡。这说明, 在本文的研究区间内, 山东省能源代谢系统的共生水平在总体上呈现出比较轻微的强化, 能源代谢系统内共生关系的数量有相应的增加。

2) 从总体结果上看, 山东省能源代谢系统 2000 年的共生指数为 0.633, 2005 年的共生指数为 0.870, 2010 年的共生指数为 0.962, 2014 年的共生指数为 0.9, 山东省能源代谢系统的共生指数在 0.6~1 之间变化, 没有出现大于 1 的年份。这说明, 山东省能源代谢系统内, 各组分之间的正效用小于负效用, 能源系统保持了高度竞争性和掠夺性。

3) 从政策含义分析, 山东省能源代谢系统的共生指数这四年一直保持在小于 1 的水平, 但这并不代表山东省不是一个积极、可持续和正面的能源代谢系统。系统共生指数体现的是系统内组分之间正负效用的平衡, 而不是系统内部共生关系的比例。此外, 通常对系统组分细化的不足会导致对系统内部竞争关系体现的不足, 因此可以认为在本文的能源代谢组分划分基础上, 山东省系统还有相当一部分的共生关系被生态网络模型及分析方法掩盖, 山东省能源代谢系统实际的共生水平应该比分析计算结果更高。

4. 结论

通过以上分析, 本文得出如下结论:

1) 山东省能源代谢系统各分室间的共生关系较少, 是由竞争关系以及(掠夺)控制关系所主导的系统, 是一个具有高度竞争和掠夺性的代谢共生体。

2) 随着时间推移, 山东省能源代谢系统中各组分间的作用途径也更为多样, 代谢路径数量和连通性也不断提高。能源系统的代谢种类多, 能源网络和层级结构复杂使得能源代谢系统愈加稳定。

参考文献 (References)

- [1] Taylor, P.J. and Derudder, B. (2003) World City Network.
- [2] Taylor, P.J., Walker, D.R.F., Catalano, G., et al. (2002) Diversity and Power in the World City Network. *Cities*, **19**, 231-241. [https://doi.org/10.1016/S0264-2751\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0264-2751(02)00020-3)
- [3] Taylor, P.J., Catalano, G. and Walker, D.R.F. (2002) Measurement of the World City Network. *Urban Studies*, **39**,

- 2367-2376. <https://doi.org/10.1080/00420980220080011>
- [4] 刘华军, 刘传明, 孙亚男. 中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究[J]. 中国工业经济, 2015(5): 83-95.
- [5] 姜巍, 高卫东, 熊天琦. 中国能源产业网络结构特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 196-202.
- [6] 李响. 基于社会网络分析的长三角城市群网络结构研究[J]. 城市发展研究, 2011, 18(12): 80-85.
- [7] 孟德友, 赵文亮. 基于时间距离的河南城市经济联系及其空间结构[J]. 城市发展研究, 2011(6): 104-110.
- [8] Fath, B.D. and Patten, B.C. (1999) Review of the Foundations of Network Environ Analysis. *Ecosystems*, **2**, 167-179. <https://doi.org/10.1007/s100219900067>
- [9] Hannon, B. (1973) The Structure of Ecosystems. *Journal of Theoretical Biology*, **41**, 535-546. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(73\)90060-X](https://doi.org/10.1016/0022-5193(73)90060-X)
- [10] Patten, B.C., Bosserman, R.W., Finn, J.T., et al. (1976) Propagation of Cause in Ecosystems. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, **IV**, 457-579. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-547204-3.50056-7>
- [11] Finn, J.T. (1983) Ecology: Cycling Index. *Nature*, **304**, 397-397. <https://doi.org/10.1038/304397a0>
- [12] Fath, B.D., Scharler, U.M., Ulanowicz, R.E., et al. (2007) Ecological Network Analysis: Network Construction. *Ecological Modelling*, **208**, 49-55. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.04.029>
- [13] Fath, B.D. and Grant, W.E. (2007) Ecosystems as Evolutionary Complex Systems: Network Analysis of Fitness Models. *Environmental Modelling & Software*, **22**, 693-700. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.023>
- [14] Zhang, Y., Zheng, H. and Fath, B.D. (2014) Ecological Network Analysis of an Industrial Symbiosis System: A Case Study of the Shandong Lubei Eco-Industrial Park. *Ecological Modelling*.
- [15] Zhang, Y., Yang, Z., Fath, B.D., et al. Ecological Network Analysis of an Urban Energy Metabolic System: Model Development, and a Case Study of Four Chinese Cities.
- [16] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 等. 基于生态网络的城市代谢结构模拟研究—以大连市为例[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5926-5934.
- [17] Ulanowicz, R.E. (2005) Quantitative Methods for Ecological Network Analysis. *Computational Biology & Chemistry*, **28**, 321-339. <https://doi.org/10.1016/j.compbiolchem.2004.09.001>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org