

DOI: 10.5846/stxb201505130979

胡科, 刘晓磊, Nath Reshmita, 崔雪锋. 应用生态网络分析方法评价中国经济系统的可持续性. 生态学报, 2016, 36(24): - .

Hu K, Liu X L, Nath Reshmita, Cui X F. Quantifying the economic sustainability of China: An ecological network analysis approach. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): - .

## 应用生态网络分析方法评价中国经济系统的可持续性

胡 科<sup>1,2</sup>, 刘晓磊<sup>1</sup>, Nath Reshmita<sup>3</sup>, 崔雪锋<sup>1,\*</sup>

1 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

3 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

**摘要:**将生态网络分析方法应用于中国经济系统的可持续性分析。依据 1987—2010 年的投入产出数据, 构建中国经济系统的货币网络流, 用生态网络指标量化经济系统的网络特征和变化情况, 探讨中国经济系统中增长与发展的变化及其可持续性。主要结论有: (1) 1987—2010 年间中国经济系统的总吞吐量呈指数增长趋势, 网络规模不断增长。(2) 1987—2010 年间中国经济的系统效率在波动中呈增加趋势, 但增长幅度较小。从长期阶段看, 1997—2010 年间的系统效率和组织能力比 1987—1995 年间有明显提高, 表明经济系统获得了一定程度的发展。但系统效率在 2002 年达到高点后呈现出下降趋势。(3) 1987—2010 年间中国经济系统的上升性和发展能力都在持续提高, 但主要来自规模增长。增长和发展的量化结果表明, 1987—2010 年间中国经济系统上升性的提高, 90% 来自总吞吐量(增长), 只有 10% 来自效率改进(发展)。(4) 1987—2010 年间的中国经济系统的  $\alpha$  平均值为 0.138, 远小于 0.37(或 0.33) 可持续性最优平衡点, 系统处于缺乏效率的不可持续的状态。要提高经济系统的可持续性, 需要提高经济系统的效率(结构)和组织能力。

**关键词:**生态网络分析; 中国经济系统; 增长; 发展; 可持续性

## Quantifying the economic sustainability of China: An ecological network analysis approach

HU Ke<sup>1,2</sup>, LIU Xiaolei<sup>1</sup>, Nath Reshmita<sup>3</sup>, CUI Xuefeng<sup>1,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

3 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract:** The term economic development is quite different from the economic growth, but both are closely related to the economic sustainability. Therefore, the quantification of growth and development is extremely important to assess the economically sustainable development of a country. In this paper, we quantify the growth, development, and sustainability of Chinese economy by employing the Ecological Network Analysis (ENA) approach. This has been widely used to address the sustainability of ecological system, and subsequently being adopted in economic system for analysis and case study. In the case of China, using input-output table data, the economic system can be represented by a six sector currency network flow. The ENA indicators of the network are calculated from 1987 to 2010, to address the features and trends of growth, development, and sustainability of the Chinese economic system. The results show that, the Total System Throughput (TST) of the network grows exponentially from 1987 to 2010, which implies that the Chinese economic system grows rapidly from

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41271542); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN-14-25)

**收稿日期:**2015-05-13; **修订日期:**2016-01-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuefeng.cui@bnu.edu.cn

1987 to 2010. During the same period, the trend in the efficiency of economic system is rather complex, by smaller degree of increase with fluctuations. From the perspective of later decade, the efficiency during 1997—2010 is certainly higher than the efficiency during 1987—1995. This implies that the Chinese economic system has obtained some degree of development in the latter half of our analysis. Contrastingly, the efficiency exhibits a declining trend from 2002 onwards, which needs to be paid special attention. Both the Ascendency ( $A$ ) and the Development Capacity ( $C$ ) of Chinese economic system continued to improve from 1987 to 2010, which is primarily due to the rapid growth of the TST in the same period. TST, contributes atleast 90% to the Chinese economic system between 1987 and 2010, whereas, the contribution of the efficiency is only 10% during the same period. This implies that growth and development attribute 90% and 10% to the Chinese economic system between 1987 and 2010, respectively. The average value of the Chinese economic system i.e.  $\alpha$  is 0.138 during 1987—2010, which is far less than the Sustainability Optimal Value of 0.37 (or 0.33). This is indicative to the fact that the Chinese economic system is in unsustainable condition, and that is due to lack of efficiency. In order to improve the sustainability of the economic system, some measures need to be taken to improve the efficiency and organization of the economic system.

In the six sectors currency network of China, the TST indicator exhibits more or less similar trend with the GDP of China. Average Mutual Information (AMI) indicator' change trend is also in accord with the reality change of the Chinese economy. But the average  $\alpha$  value of the network during 1987—2010 is just 0.138 and that is much lower than the Sustainability Optimal Value of 0.37. This is from the observation in the ecological system, and is uncertain whether this value suits appropriately to the economic system or not. Even through, we know that the Chinese currency network average  $\alpha$  value (0.138) is lower than the global virtual water trade network (0.181) and the global petroleum trade network (0.199) average  $\alpha$  value during 1896—2001 and 2007—2001, respectively. This further concludes that the Chinese economic system is in the low efficiency condition.

**Key Words:** ecological network analysis; China economic system; growth; development; sustainability

定量测度发展的可持续性状态的可持续发展评估研究就成为可持续发展研究的重要内容之一<sup>[1]</sup>。目前可持续发展的评价方法主要有:(1)建立可持续发展评价指标体系,根据指标得分和权重量化区域的可持续性。但指标体系的建立和指标权重的确定通常具有较强的主观性,且指标体系中的每一个指标与可持续性的内在联系解释的不充分<sup>[2]</sup>。(2)生态足迹方法,该方法通过计算人类活动的生态足迹与土地的生态承载力,判断一个区域是否处于可持续发展的状态,或者通过趋势分析告诉人们是接近或者远离了可持续发展的目标。但忽略了开放系统下的区域的生态差异<sup>[3]</sup>和人类资本对经济的贡献<sup>[4]</sup>,其实质仍属于承载力的范畴。(3)能值分析法,该方法将区域的各种能量转换为同一标准的太阳能值来衡量和分析生区域环境的可持续状况,同时考虑了人类活动和自然环境对发展的贡献。但未能从根本上解决方法体系中核心的能值转化率的确定问题,其转化率的确定受人为影响较大,没有考虑到环境的影响因素<sup>[5]</sup>。可见,这些可持续发展评价方法都存在着某些方面的不足,而且都未能澄清增长与发展之间关系。

生态经济学家赫尔曼·E·戴利区分了经济增长与发展的不同:增长是指用以维持商品的生产 and 消费的经济活动的物质/能量流量在物理规模上的加剧;而来源于技术知识的改善或是对目标的更深理解,由既定流量规模构成的使用中的性能改善,才被称之为发展<sup>[6]</sup>;二者并不一致但都与经济系统的可持续性密切相关。因此,经济系统的可持续性评价,需辨明经济系统中的增长、发展以及可持续性的相互关系。然而,传统的GDP/GNP指标以及目前的可持续发展评价指标尚无法澄清经济增长与发展之间的关系。

生态网络分析(Ecological Network Analysis, ENA)方法可以量化生态系统内部各组分之间联系方式、作用关系<sup>[7-10]</sup>,定量辨识生态系统中的增长与发展之间的关系<sup>[11-12]</sup>,已广泛应用于生态系统的稳定性、健康性、系统效率和可持续性评价,并逐渐应用于城市代谢系统、产业模式、景观生态、流域水资源系统评价<sup>[13]</sup>。近年来

有研究指向生态网络分析在经济系统应用的理论探讨和实证分析。Templet<sup>[14]</sup>选取了 6 个发达国家和 6 个发展中国家,用经济部门间的能源网络来测度这 12 个国家经济系统的多样性指数、能源吞吐量和发展能力等指标,并将这三项指标的变化趋势与国民生产总值(GNP)变化趋势进行对比。认为在 1971—1988 年间发展中国家的经济系统的多样性增长较少或呈负增长趋势,而能源吞吐量和能力增长较快;发达国家的情况则比较复杂,在不同的阶段和不同的国家呈现出不同的变化趋势。GNP 的增长趋势与发展能力的增长趋势具有相关性,发展中国家的能源吞吐量对发展能力的贡献较大,发达国家的能源吞吐量对发展能力的贡献较少。Goerner 等<sup>[15]</sup>讨论了网络分析方法在量化经济发展方面的应用性,认为类似的能量概念和网络分析的方法可以适用于所有的物质-能量-信息流系统,系统科学的长期观察和有关自组织系统的研究也同样证实了系统的行为模式和发展动力学表现出强烈的相似之处。并指出传统的经济测量指标(如 GNP)并不能测度经济的健康状况,而网络分析法可以有效识别出经济泡沫,这种量化经济发展的方法有助于了解长期的经济健康和优化市场功能。Kharrazi 等<sup>[16]</sup>分析了 6 种经济资源的贸易网络,包括 227 个国家 58 种商品的虚拟水贸易、137 个国家的石油贸易、全球的商品贸易、经合组织-金砖四国的商品贸易、经合组织-金砖四国的外国直接投资、199 个国家的钢铁贸易。得出的 6 种经济资源贸易网络的效率与冗余的平衡值,均比自然生态系统的最优平衡值小,原因是经济资源网络的发展能力在持续提高,为系统提供了更多剩余。国内黄茄莉和徐中民<sup>[17-18]</sup>研究了甘肃省经济系统 1987—1995 年间的上升性和发展能力的发展趋势;用经济系统的货币网络流评价了北京市经济系统 1985—2005 年的上升性、恢复力和可持续性的变化趋势,以及各经济部门对上升性的贡献程度。肖强等人<sup>[19]</sup>测算了重庆市经济系统 1990—2006 年的上升性发展趋势,并将其与能源消费量和污染排放量进行了时间序列分析。

本文应用生态网络分析方法评价 1987—2010 年间中国经济系统的增长与发展情况及其可持续性。下面,首先构建经济系统的货币网络流,然后用生态网络指标量化中国经济网络的特征及其变化情况,最后分析经济系统的规模、效率的变化情况及其可持续性状态。

## 1 中国经济系统 ENA 指标的计算

### 1.1 数据来源

建立中国经济货币网络的流量数据来自中国 1987、1990、1992、1995、1997、2000、2002、2005、2007、2010 年 10 期投入产出表,数据来源于中国统计年鉴。由于不同年份投入产出表的经济部门分类有所不同,为了统一口径和便于分析,我们根据行业特征对不同年份的投入产出表进行部门合并,共分为农业、工业、建筑业、运输邮电、商业饮食、其他服务业 6 类。另外,由于我国 1987—1995 年的投入产出表中没有区分各部门的进口和出口,而是将其合并为净出口一项。为了得到 1987—1995 年各部门的进出口数据,我们参照李强和薛天栋<sup>[20]</sup>各产业进口和出口的比率,结合对应年份的净出口数据,得到 1987—1995 年各部门的出口和进口数据。

### 1.2 经济货币网络的构建

用生态网络分析中的输入、输出、内部流动、耗散四类流<sup>[21]</sup>,分别与投入产出表中各部门的进口、出口、部门流量矩阵、最终使用(剔除出口)对应,用网络中的结点代表各个部门,流量代表部门之间的价值转移,获得中国经济系统的六部门货币网络(图 1)。

### 1.3 网络的生长

生态网络分析中,增长(Growth)被定义为系统规模的增加或扩张,表现为系统空间范围的扩张或网络媒介流量(物质-能量-信息)的增加<sup>[11]</sup>,常用系统总吞吐量(Total System Throughput, TST)指标来衡量。

定义  $T_{ij}$  是从分室  $i$  流入分室  $j$  的媒介流量,则  $T_{i\cdot} (= \sum_j T_{ij})$  为某一时刻从分室  $i$  流出的所有媒介流量,  $T_{\cdot j} (= \sum_i T_{ij})$  为同一时刻流入分室  $j$  的所有(媒介)流量,  $T_{\cdot\cdot} (= \sum_{i,j} T_{ij})$  则为该时刻系统所有活动产生的(媒介)流量的总和。故系统总吞吐量用式 1 计算。

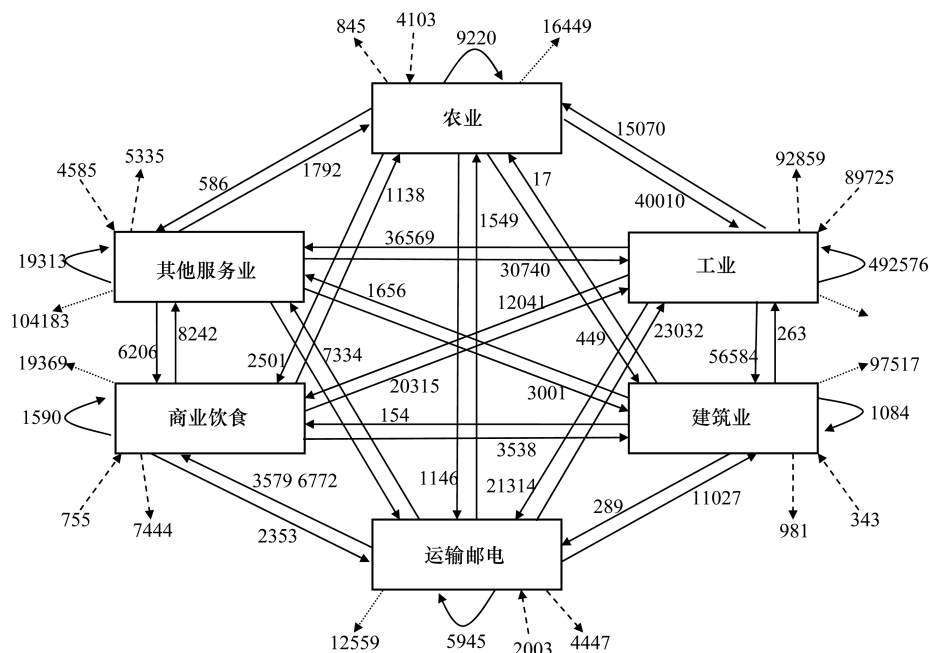


图 1 2010 年中国经济系统 6 部门货币网络流 (亿元)

Fig.1 Currency network flows among six sectors of China economic system in 2010 (  $10^8$  yuan)

实线直线箭头表示部门间流入流出,实线弯曲箭头表示部门对自身的投入,向外的虚线箭头表示部门的出口,向内的虚线箭头部门进口,向外的点线箭头表示部门的最终使用(剔除出口部分)

$$TST = \sum_{i,j} T_{ij} = T_{..} \quad (1)$$

式中, TST 为系统总吞吐量指标,它是系统中各类媒介流量(物质-能量-信息)的总和,用来表征系统网络的总体规模和活动量。

根据式 1 计算得出 1987—2010 年中国经济系统的 TST(表 1)。计算时,为了排除货币网络的价格因素影响,我们将不同年份的 TST 统一调整为 1987 年的不变价格。

#### 1.4 网络的发展

生态网络分析中的发展(Development)被定义为系统组织和结构功能的增强,是独立于系统规模的成分<sup>[11]</sup>,用系统的平均相互信息(Average Mutual Information, AMI)指标衡量。

信息是不确定性的降低。假设事件  $i$  发生的概率为  $p(i)$ ,发生的不确定性为  $h_i$ ,则  $h_i = -k \log p(i)$ 。整个系统的不确定性可以表示为式 2。在网络分析中,  $h_i$  表征事件发生变化的潜力,事件发生的概率越大,发生变化的潜力越小;  $H$  表示整个系统经历变化的总能力,被定义为多样性(Diversity);  $k$  为信息变量单位,  $k$  的数值依据公式中对数的底数确定,如果对数的底数为 2,则  $k$  为 1 比特(Bit),如果取自然对数,则  $k$  是 1 奈特(Nat)。

$$H = \sum_i p(i) h_i = -k \sum_i p(i) \log p(i) \quad (2)$$

若已获知事件  $i$  发生的不确定性和事件  $j$  发生时事件  $i$  发生的不确定性,则可以求出由  $j$  引起的  $i$  不确定性的降低,即  $j$  带给  $i$  的信息。可表示为式 3。

$$X(i|j) = [-k \log p(i)] - [-k \log p(i|j)] = k \log \left( \frac{p(ij)}{p(i)p(j)} \right) = [-k \log p(j)] - [-k \log p(j|i)] = X(j|i) \quad (3)$$

由式 3 可知,事件  $j$  带给  $i$  的信息与事件  $i$  带给  $j$  的信息是相互一致的。因此,可以认为式 3 是事件  $i$  和  $j$  提供给彼此的相互信息。整个系统的平均相互信息(AMI)可以表示为式 4。

$$AMI = k \sum_i \sum_j p(ij) \log\left(\frac{p(ij)}{p(j)p(i)}\right) \quad (4)$$

在网络分析中,事件  $i$  可以被描绘为媒介流量流出分室  $i$ ,事件  $j$  可以被描绘为媒介流量进入分室  $j$ 。事件  $ij$  可以被描绘为媒介流量由分室  $i$  流出并且进入分室  $j$ 。那么事件  $i$ ,事件  $j$ ,以及  $ij$  的概率可以分别表示为:  $p(i) \frac{T_i}{T_{..}}$ ,  $p(j) \frac{T_j}{T_{..}}$ ,  $p(ij) \frac{T_{ij}}{T_{..}}$ 。将其分别带入式 2 和式 4,则可以得到在网络分析中的多样性指数(式 5),和平均相互信息(式 6)。

$$H = -k \sum_{i,j} \frac{T_{ij}}{T_{..}} \log\left(\frac{T_{ij}}{T_{..}}\right) \quad (5)$$

$$AMI = k \sum_{i,j} \frac{T_{ij}}{T_{..}} \log\left(\frac{T_{ij} T_{..}}{T_j T_i}\right) \quad (6)$$

式 5 中的  $H$  为系统的多样性指数,式 6 中  $AMI$  为系统的平均相互信息。根据对数函数的凸性可知,  $H \geq AMI \geq 0$ ,即多样性指数是平均相互信息的上限。系统的  $AMI$  是  $H$  中的有效部分, $AMI$  通过结构约束,提高系统效率。系统越有序、规则,表示系统的效率越高效、连贯。 $AMI$  的值越高,表示系统的媒介流量受到的结构约束越强,这样的系统称为高度组织化的。等量的媒介流量在比较确定的网络连接中传输所带来的效率,要高于其在不确定的网络连接中的传输效率,系统  $AMI$  的提高意味着组织能力的提高,故  $AMI$  的提高被视为系统的发展。

根据式 5 和式 6,分别计算得出中国经济系统网络在 1987—2010 年间的系统多样性指数( $H$ )和平均相互信息( $AMI$ )的变化情况(表 1)。

## 2.5 网络的上升性、恢复力与发展能力

系统总吞吐量( $TST$ )与平均相互信息( $AMI$ )的乘积被定义为上升性( $Ascendency, A$ )<sup>[11]</sup>(式 7),用来表征系统的发展程度。上升性指标综合了系统总吞吐量(增长)和平均相互信息(发展)的共同作用,它是系统中受到结构约束的规模部分,衡量系统中的有效部分。

$$A = TST \cdot AMI = \sum_{i,j} T_{ij} \log\left(\frac{T_{ij} T_{..}}{T_j T_i}\right) \quad (7)$$

系统总吞吐量( $TST$ )和多样性指数( $H$ )的乘积被定义为系统的发展能力( $Development Capacity, C$ )<sup>[11]</sup>(式 8),它是上升性( $A$ )的上限。因为存在  $H \geq AMI \geq 0$ ,故存在  $C \geq A \geq 0$ 。

$$C = TST \cdot H = -k \sum_{i,j} T_{ij} \log\left(\frac{T_{ij}}{T_{..}}\right) \quad (8)$$

系统的发展能力( $C$ )与上升性( $A$ )的差值为系统冗余量,表征系统的无序部分。定义为系统的恢复力( $Resilience, R$ )<sup>[22]</sup>(式 9)。

$$R = C - A \quad (9)$$

式 7、8、9 中的  $A$ 、 $R$ 、 $C$  分别代表系统的上升性、恢复力和发展能力。在系统演进的过程中,系统的上升性和恢复力是相互对立的作用力,上升性使系统向更加有效率的方向发展,而恢复力使系统向更加无效率的方向发展。系统的上升性过低、恢复力过高,则意味着系统较为无序,结构约束不强(效率低),缺乏扩张的活力和生存所需的自组织能力,发展会趋于停滞甚至衰退;如果系统的效率(上升性)过高、恢复力过低,则系统的结构约束太强,系统会比较脆弱,轻微扰动便会引起系统的崩溃。从整体的角度来看,只有系统的效率(上升性)和恢复力之间维持一个合理的平衡,系统才能持续下去,即只有当上升性与恢复力平衡在合理范围内,系统才是可持续的。系统离这一平衡点越远,可持续性越弱。因此,可通过比较上升性和恢复力的比例关系及其变化情况,可以判断系统的可持续发展状态。

根据式 7、8、9,分别计算得出中国经济网络 1987—2010 年间上升性( $A$ )、发展能力( $C$ )、恢复力( $R$ )的变

化情况(表 1)。

表 1 中国 6 部门经济系统的生态网络分析指标

Table 1 ENA indicators of six sectors network of China economic system

| 年份                 | 1987  | 1990  | 1992  | 1995   | 1997   | 2000   | 2002   | 2005   | 2007   | 2010   |
|--------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 总系统吞吐量 TST (亿元)    | 25667 | 35689 | 46768 | 64756  | 88046  | 120512 | 148106 | 241573 | 305147 | 412879 |
| 多样性指数 H (比特)       | 1.953 | 1.863 | 1.991 | 1.880  | 2.061  | 2.078  | 2.246  | 2.099  | 1.954  | 1.973  |
| 平均相互信息 AMI (比特)    | 0.245 | 0.210 | 0.214 | 0.239  | 0.292  | 0.316  | 0.337  | 0.309  | 0.313  | 0.300  |
| 上升性 A (亿元/比特)      | 6293  | 7492  | 9992  | 15448  | 25720  | 38138  | 49848  | 74655  | 95572  | 123920 |
| 恢复力 R (亿元/比特)      | 43830 | 59001 | 83129 | 106316 | 155732 | 212268 | 282795 | 432494 | 500683 | 690857 |
| 发展能力 C (亿元/比特)     | 50123 | 66493 | 93121 | 121764 | 181452 | 250406 | 332642 | 507150 | 596255 | 814778 |
| $\alpha = A/C$ (%) | 12.55 | 11.27 | 10.73 | 12.69  | 14.17  | 15.23  | 14.99  | 14.72  | 16.03  | 15.21  |

## 2.6 网络中增长与发展的量化

若  $V=xy$ , 且  $x$  和  $y$  对  $V$  的影响程度相同。则  $x$  和  $y$  对  $\Delta V$  的贡献率可由式 10 获得。

$$x_{effect} = y_0 \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x \Delta y \quad y_{effect} = x_0 \Delta y + \frac{1}{2} \Delta x \Delta y \quad (10)$$

前已述及, 系统的上升性(A)受总吞吐量(TST)和平均相互信息(AMI)的共同作用, 有  $A = TST \times AMI$ , 假设 TST 和 AMI 对 A 具有相同的影响程度<sup>[23]</sup>, 则根据 1987—2010 年的 TST、AMI 和 A 的值可求的中国经济系统各时间段 TST 和 AMI 对 A 的贡献率(表 2)。

表 2 增长和发展对中国经济系统的贡献率/%

Table 2 Contribution of TST and AMI to Ascendency in six sectors network of China economic system

| 时间段     | 87—90 | 90—92 | 92—95 | 95—97 | 97—00 | 00—02 | 02—05 | 05—07 | 07—10 | 1987—2010 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| TST 贡献率 | 190   | 94    | 75    | 60    | 80    | 77    | 122   | 95    | 117   | 90        |
| AMI 贡献率 | -90   | 6     | 25    | 40    | 20    | 23    | -22   | 5     | -17   | 10        |

## 2 中国经济网络特征与可持续性分析

### 2.1 系统总吞吐量与增长

图 2 显示了 1987—2010 年间中国经济系统的不变价格总吞吐量(TST)的变化趋势。中国经济系统的 TST 不断增长, 由 1987 年的 25667 亿元/年增长到 2010 年的 412879 亿元/年(1987 年不变价格), 从生态网络分析的角度看, 中国经济系统规模在不断增长(Growth)。假设系统的 TST 按指数趋势增长, 则该时期 TST 的年均增长速度高达 12.84%。这与 Templet<sup>[14]</sup> 的研究结论相符, Templet 用 6 个发展中国家和 6 个发达国家的经济部门间的能源网络进行对比研究, 发现发展中国家网络的 TST 都增长较快, 与 GNP 增速有明显的相关性。

### 2.2 平均相互信息与发展

图 3 显示了 1987—2010 年中国经济系统的平均相互信息(AMI)变化趋势。整体来看, 中国经济系统的 AMI 在波动中增加, 但增长趋势不明显。大体分为两个阶段, 第一阶段为 1987—1995 年 AMI 值较低的阶段, AMI 平均值为 0.227; 第二阶段为 1997—2010 年 AMI 值较高的阶段, AMI 平均值提高到了 0.311。从生态网络

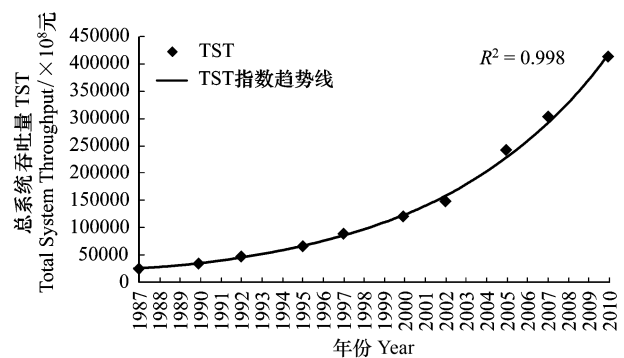


图 2 中国经济系统 1987—2010 年的总吞吐量变化曲线

Fig.2 TST trend line of six sectors network of China economic system, between 1987 to 2010

分析的角度来看,系统 AMI 的提高意味着系统的结构(效率)和组织能力越高。表明中国经济在 1997—2010 年间的系统效率要高于 1987—1995 年间的系统效率,从长期来看,经济系统获得了一定的发展(Development)。但系统效率的增长趋势不明显,远小于系统总吞吐量的增长速度。

AMI 的低点出现在 1990—1992 年,表明当时的中国经济效率较低,这与 20 世纪 90 年代初的亚洲经济衰退相吻合。AMI 的高点出现在 2002 年,表明当年的经济效率较高,这与 2001、2002 年中国经济出现的效率提高与“有效降价”现象<sup>[24]</sup>相吻合。

值得注意的是 AMI 在 2002 年达到高点(0.337)后出现了下降趋势,表明中国经济系统的效率在 2002 年以后有所下降。这与 2002 年前后中国经济需求结构发生的剧烈变化相一致。2002 年以前拉动中国经济增长的最最终需求顺序为:消费-投资-出口,随着加入 WTO 以后进出口贸易的快速增长,2002 年以后最终需求顺序急剧变为:出口-投资-消费。可见 2002 年以后出口对经济的带动显著加强,而出口中有一半左右是“两头在外”型的加工出口贸易<sup>[25]</sup>。这种加工出口贸易的发展增加了经济网络的吞吐量(增长),但其在国内阶段的技术含量低、属于粗放型增长产业,这对中国经济系统的整体结构(效率)造成了影响。从生态网络分析的角度而言,尽管中国经济自 2002 年以后仍保持了较高水平的经济增长趋势,但经济系统效率并没有显著提高,系统的组织能力并未得到发展。

### 2.3 可持续性分析

图 4 表明 1987—2010 年间中国经济系统的上升性(A)和发展能力(C)的都呈现出持续提高的变化趋势,表明中国经济系统的发展程度和发展能力都在快速增加。但由系统总吞吐量(TST)、平均相互信息(AMI)和多样性指数(H)的变化幅度来看(表 1),上升性和发展能力的提高主要是由系统总吞吐量的增加引起的,结构(效率)改进的作用较小。通过分离系统总吞吐量(增长)和平均相互信息(发展)对上升性的贡献率可知:1987—2010 年间中国经济系统上升性的提高,90%来自总吞吐量的增加,只有 10%来自效率改进(表 2)。

这与 Templet<sup>[13]</sup>的研究结论相符,Templet 对 6 个发展中国家和 6 个发达国家的能源网络进行的对比研究表明,发展中国家的发展能力(C)的提高主要来自系统总吞吐量(TST),系统多样性指数(H)的增长较少或呈负增长;发达国家的系统吞吐量(TST)对发展能力(C)的贡献较少。

前已述及,通过比较上升性(A)和恢复力(R)的比例关系及其变化情况,可以判断系统的可持续发展状态。但是由于 A 和 R 比值可以在负值(R 为负)和无穷大值(R 极小)之间,不便判断分析,因此通常用上升性(A)与发展能力(C)的比值  $\alpha = (A/C)$  来判断系统的可持续性状况。图 4 表明 1987—2010 年间中国经济系统的  $\alpha$  值在整体上在波动中呈增加趋势,但增长幅度较小,从 1987 年的 0.126 增加到 2010 年的 0.152,1987—2010 年间的  $\alpha$  平均值为 0.138。

Ulanowicz<sup>[22]</sup>得出在自然生态系统中,上升性与恢复力比例在 0.85 是系统可持续性的最优平衡点,即  $\alpha$  的最优值为 0.4596。但是经济系统网络(受人类影响的网络)要比自然生态系统网络复杂的多,例如在经济

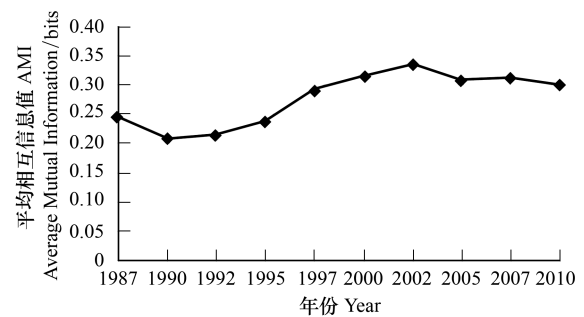


图 3 中国经济系统 1987—2010 年的 AMI 变化情况

Fig.3 AMI of six sectors network of China economic system, between 1987 to 2010

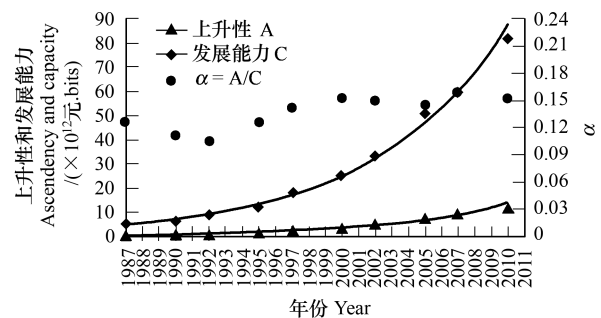


图 4 中国经济系统 1987—2010 年的 A、C、 $\alpha$  变化情况

Fig.4 A, C and  $\alpha$  of six sectors network of China economic system, between 1987 to 2010

系统网络中,货币流(及其隐含的物质-能量-信息流)可以在网络分室(节点)间双向流动,而自然生态系统的食物链结构通常是兔吃草、狼吃兔的单项物质能量流动。Lietaer<sup>[26]</sup>等认为复杂网络流的最优状态下恢复力几乎是效率的两倍,即 $\alpha$ 的最优值为0.33, Morris<sup>[27]</sup>等认为大量赋予权重的随机网络的稳定子集最优值逼近 $1/e$ 的渐近线,即 $\alpha$ 的最优值为0.37。在实证方面, Kharrazi 等<sup>[16]</sup>得出全球227国虚拟水贸易网络在1896—2001年间的 $\alpha$ 平均值为0.181,全球137国石油贸易网络在2007—2001年间的 $\alpha$ 平均值为0.199,全球199国钢铁贸易网络在1962—2011年间 $\alpha$ 平均值为0.127。

无论从那种角度来看,中国经济系统的 $\alpha$ 平均值(0.138)都相对较低,远小于0.37(或0.33)可持续性最优平衡点,也低于全球虚拟水贸易的 $\alpha$ 平均值和石油贸易的 $\alpha$ 平均值,仅比全球钢铁贸易的 $\alpha$ 平均值略高,且全球钢铁贸易网络 $\alpha$ 平均值的时间跨度为1962—2011(时间跨度拉低了平均值)。从网络分析的角度看,中国经济系统的 $\alpha$ 值过小,意味着系统较为无序、结构约束不强、效率过低,缺乏扩张的活力和生存所需的自组织能力,这样的系统处于不可持续状态。要提高系统的可持续性,需要提高经济系统的效率(结构)和组织能力。

### 3 结论

本文简要介绍了生态网络分析方法在经济领域的应用,构建了中国经济系统的货币网络流,通过计算系统总吞吐量、平均相互信息、上升性、发展能力等网络指标,明确了中国经济的规模(增长)和效率(发展)的变化趋势,量化了增长和发展各自对系统上升性的贡献,讨论了中国经济系统的可持续性状态。主要结论有:

(1)1987—2010年间中国经济系统的总吞吐量(不变价格)不断增大,呈显著的指数增长态势,表明中国的经济系统的规模在快速增长(Growth)。

(2)1987—2010年间中国经济系统的平均相互信息在波动中有所上升,但趋势不明显,远小于总吞吐量的变化幅度。表明中国经济效率的提高速度远小于经济规模的增长速度。

从长期阶段来看,1997—2010年间的平均相互信息相比1987—1995年间有所提高,表明中国经济系统的效率(结构)和组织能力有所提高,中国的经济系统获得了一定的发展(Development)。

(3)中国经济系统的总吞吐量持续增长的同时,平均相互信息却在2002年达到高点后出现了下降趋势。表明尽管中国经济自2002年以后仍保持了较高水平的增长趋势,但经济系统效率并没有显著提高,系统的组织能力并未得到发展。

(4)1987—2010年间中国经济系统的上升性和发展能力的都呈现出指数增长趋势,表明中国经济系统的发展程度和发展能力都在提高。但主要源于系统总吞吐量的增加,而结构(效率)改进的作用较小。增长和发展的量化结果表明,1987—2010年间中国经济系统上升性的提高,90%来自总吞吐量(增长),只有10%来自效率改进(发展)。

(5)中国经济系统的 $\alpha$ 值从1987年的0.126增加到2010年的0.152,整体上呈增加趋势,但增长幅度较小。1987—2010年间的 $\alpha$ 平均值为0.138,远小于0.37(或0.33)可持续性最优平衡点。表明中国经济系统缺乏效率,处于不可持续的状态。要提高经济系统的可持续性,需要提高经济系统的效率(结构)和组织能力。

### 参考文献(References):

- [1] 张志强,程国栋,徐中民. 可持续发展评估指标、方法及应用研究. 冰川冻土, 2002, 24(4): 344-360.
- [2] 李利锋,郑度. 区域可持续发展评价: 进展与展望. 地理科学进展, 2002, 21(3): 237-248.
- [3] 张芳怡,濮励杰,张健. 基于能值分析理论的生态足迹模型及应用——以江苏省为例. 自然资源学报, 2006, 21(4): 653-660.
- [4] 赵志强,李双成,高阳. 基于能值改进的开放系统生态足迹模型及其应用——以深圳市为例. 生态学报, 2008, 28(5): 2220-2231.
- [5] 徐中民,程国栋. 人地系统中人文因素作用的分析框架探讨. 科技导报, 2008, 26(3): 86-92.
- [6] 赫尔曼·E·戴利. 超越增长: 可持续发展的经济学. 诸大建,胡圣译. 上海:上海译文出版社, 2001.
- [7] Fath BD, Patten BC. Review of the foundations of network environ analysis. Ecosystems, 1999, 2(2): 167-179.



- [ 8 ] Ulanowicz RE. An hypothesis on the development of natural communities. *J Theor Biol*, 1980, 85(2): 223 - 245.
- [ 9 ] Fath BD, Scharler UM, Ulanowicz R E, Hannon B. Ecological network analysis: network construction. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 49-55.
- [ 10 ] 韩博平, 林鹏. 生态网络中信息分析的方法与应用. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1996, 35(4): 648-651.
- [ 11 ] Ulanowicz RE. *Growth and development: ecosystems phenomenology*. New York: Springer-Verlag, 1986.
- [ 12 ] Ulanowicz RE. *Ecology, the ascendent perspective*. New York: Columbia University Press, 1997.
- [ 13 ] 李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 张漪. 生态网络分析方法研究综述. *生态学报*, 2011, 31(18): 5396-5405.
- [ 14 ] Templett PH. Energy, diversity and development in economic systems: an empirical analysis. *Ecology Economics*, 1999, 30(2): 223-233.
- [ 15 ] Goerner SJ, Lietaer B, Ulanowicz RE. Quantifying economic sustainability: implications for free-enterprise theory, policy and practice. *Ecological Economics*, 2009, 69(1): 76 - 81.
- [ 16 ] Kharrazi A, Rovenskaya E, Fath BD, Yarime M, Kraines S. Quantifying the sustainability of economic resource networks: An ecological information-based approach. *Ecological Economics*, 2013, 90: 177-186.
- [ 17 ] 黄茄莉, 徐中民. 上升性理论在经济系统中的应用——以甘肃省为例. *生态学报*, 2007, 27(11): 4785-4792.
- [ 18 ] 黄茄莉, 徐中民. 从演化的角度评价北京市经济系统可持续发展趋势. *生态学报*, 2010, 30(24): 7038-7044.
- [ 19 ] 肖强, 文礼章, 易定宏, 胡聘, 于盈盈, 张海涛. 基于上升性理论的重庆市生态经济系统投入产出分析. *生态学报*, 2010, 30(5): 1148-1156.
- [ 20 ] 李强, 薛天栋. *中国经济发展部门分析*. 北京: 中国统计出版社, 1998.
- [ 21 ] Ulanowicz RE, Norden JS. Symmetrical overhead in flow networks. *International Journal of Systems Science*, 1990, 21(2): 429-437.
- [ 22 ] Ulanowicz RE, Goerner SJ, Lietaer B, Gomez R. Quantifying sustainability: Resilience, Efficiency and the return of information theory. *Ecological Complexity*, 2009, 6(1): 27-36.
- [ 23 ] Huang Jiali, Ulanowicz RE. Ecological Network Analysis for Economic Systems: Growth and Development and Implications for Sustainable Development. *Plos One*, 2014, 9(6): 1-8.
- [ 24 ] 樊纲. 通货紧缩、有效降价与经济波动——当前中国宏观经济若干特点的分析. *经济研究*, 2003, (7): 2-9.
- [ 25 ] 袁欣. 中国对外贸易结构与产业结构:“镜像”与“原像”的背离. *经济学家*, 2010, (6): 67-73.
- [ 26 ] Lietaer B, Ulanowicz RE, Goerner SJ. Options for managing a systemic bank crisis. *Sapiens*, 2009, 2(1): 1-15.
- [ 27 ] Morris JT, Christian RR, Ulanowicz RE. Analysis of size and complexity of randomly constructed food webs by information theoretic metrics // Belgrano A, Scharler UM, Dunne J, Ulanowicz RE. *Aquatic Food Webs: An Ecosystem Approach*. New York: Oxford University Press (USA), 2005. 73-85.