

基于上升性理论的重庆市生态经济系统投入产出分析

肖 强^{1,2}, 文礼章^{1,*}, 易定宏¹, 胡 聘², 于盈盈², 张海涛²

(1. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:从信息论的角度入手,运用上升性理论对生态经济系统增长、发展与环境质量进行定量地描述。以重庆市为例讨论了上升性理论在生态经济系统中的应用,利用投入产出表的延长表来计算产业废弃物的排放量,并利用产业废弃物的排放量来反映环境质量状况,把环境质量变化归因于受系统总吞吐量的规模效应、技术效应和结构效应的共同影响。研究结果表明,在1990—1999年重庆市生态经济系统实物型总吞吐量年均增加7.40%,上升性(A)增加近4倍,但是平均相互信息却从0.447比特降到0.342比特,废气排放量年均增长1.1%,废水排放年均增长率达3.2%,根据上升性理论表明在这10a间重庆市生态经济系统处于不可持续的发展状况。在1999—2006年,重庆市生态经济系统实物型总吞吐量仍不断增加,但年均增加率从1999—2006年的7.40%降到3.91%,上升性(A)增加了2倍多,平均相互信息从0.342比特增加到0.478比特,废气排放量的年均下降2.5%,废水排放量年均下降3.7%,这表明在这7a间重庆市生态经济系统朝着良性方向发展。要实现重庆市的生态经济系统良性发展,需提高资源在生态经济系统中的利用效率,实现资源的循环利用,加强资源在生态经济系统中各部门之间的流通性。

关键词:上升性;投入产出分析;生态经济系统;发展能力

An input-output analysis on chongqing ecological-economic system based on the ascendancy theory

XIAO Qiang^{1,2}, WEN Lizhang^{1,*}, YI Dinghong¹, HU Dan², YU Yingying², ZHANG Haitao²

1 College of Bioscience and Biotechnology Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology Center for Eco-Environmental Sciences Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Based on network flow analysis, Ulanowicz treated the average mutual information as a cardinal attribute of a developing network and developed the ascendancy formula, offering a comprehensive way to quantitatively analyze the relationship between growth and development in an eco-economic system. A basic result is that C , “the development capacity”, serves as an upper bound on ascendancy, where $C = T \times H$, H is system diversity and T is the total system throughput. To investigate the development status of Chongqing city, we use Input-Output data from 1990 to 2006 to quantify the eco-economic system performance according to Ulanowicz’s ascendancy formula. At the same time we use the extension of the I-O model to account for the discharged volume of industrial waste and the resulting situation of environmental quality based on the discharged volume of industrial waste. The change of environmental quality attributable to the structural effects and technological effects and the effect of scale on total system throughput. The results show that the system ascendancy in 1999 was four times that of 1990, but the average mutual information decreased from 0.447 bits in 1990 to 0.342 bits in 1999, the discharged volume of exhaust gases increase by 1.1% and waste water increased 3.2% on average. The results show that Chongqing’s eco-economic system was on an unsustainable path from 1990 to 1999. The system ascendancy also increased by two times from 1999 to 2006. The corresponding material representation of the total system throughput was still rising from 1999 to 2006, but the yearly rate of increase dropped from 7.40% during period of 1990—1999 to 3.91%. On

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70873121, 70573106); 国家 973 资助项目(2005CB724206); 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX2-YW-324, KZCX2-YW-422)

收稿日期:2008-12-30; 修订日期:2009-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weninsect123@yahoo.com.cn

the other hand, during the 1999—2006 period, the system ascendancy gradually increases, rising from 0.342 bits in 1999 to 0.478 bits in 2006, with the volume of discharged exhaust gas reduced by 2.5% and waste water reduced by 3.7% on average. The results suggest that Chongqing's eco-economy moved in the direction of sustainability during the period of 1999—2006. Taking into account the actual situation of Chongqing city, the most sustainable approach is to increase efficiency in resource utilization, strengthen the utilization of recycled resources, enhance communication and information sharing among industries in an impartial manner. Such measures can increase average mutual information, and can improve Chongqing's development capacity.

Key Words: ascendancy theory; input-output analysis; eco-economic system; development capacity

如何定量地判断生态经济系统的增长、发展及环境质量之间的关系,是生态学、经济学及可持续发展相关学科讨论的一个重要问题。通常对生态经济系统的研究主要从经济学、生态学、社会学和系统学^[1]四个方向来揭示发展的内涵与实质,思考方式主要从物质、能量、信息的角度入手^[2]。不管从何种角度,其核心都是试图确定人类是否生存于受人类强烈干预下的自然环境生态系统的承载力范围之内,是否实现了人与自然的和谐共存。生态足迹、能值法和熵值法是目前研究最为常用的方法,但是这些方法或多或少地存在不足之处^[3]。

生态足迹方法过分强调人类发展对环境的影响,对于各个指标的时间性、结构性考虑比较少^[4]。能值分析方法未能从根本上解决方法体系中核心的能值转换率的确定问题,其转换率受人为影响较大,没有考虑到具体环境的影响因素^[5]。熵值法虽然在某种程度上可以解决以上各种方法出现的诸多问题,但是熵值法在遇到极值或者负值的情况下就显出不足之处^[4]。

上升性理论在生态经济系统中的应用研究,国内外文献还较少报道,因此本文试图把 Ulanowicz 的上升性理论引进生态经济系统做一些尝试^[6]。首先对上升性理论进行简要介绍,并以重庆市为研究对象,用该理论结合投入产出表的延长表计算重庆市生态经济系统在 1990—2006 年 17a 间的增长与发展以及产业废弃物排放情况,分析在此 17a 间重庆市生态经济系统的发展状况及环境质量状况,并进行重庆市生态经济系统发展能力以及环境质量状况的定量评估与分析。

1 上升性理论简介

上升性理论是以网络流为对象定量研究增长与发展的理论。增长通常暗含增加或扩张,可能是空间范围的扩大也可能是网络流量的扩大^[6]。网络流量的增长可通过测量分室数目 n 和系统总吞吐量 T 来衡量。一般来说,系统总吞吐量 T 更为重要^[6]。

发展的含义比增长更深刻一些,不仅看重量的扩张,更看重质量的增长。在这里的发展定义为系统组织和结构功能的增强^[7]。从网络流的角度看,发展意味着各结点之间能进行清晰明确的物质、信息和能量交换^[7]。当已知事件 b_i 发生的不确定性及事件 a_j 发生时 b_i 发生的不确定性时,事件 b 的不确定性经事件 a 改进后得到的平均相互信息可用(1)式表示^[8]:

$$I(b;a) = k \sum_{i,j} p(a_j, b_i) \log[p(b_i/a_j)/p(b_i)] \quad (1)$$

对一个组织结构功能完好的网络流系统,如果知道时间 t 离开结点 j 的流量就可以得出很多结点 i 在时间 $t + \theta$ 所接受的信息量。用 $p(a_j)$ 代表一定数量的流量媒介在时间 t 离开结点 j 的概率,即 T_j/T , 其中 $T_j = \sum_i T_{ji}$, T_{ji} 表示从结点 j 流入结点 i 的流量,用 $p(b_i)$ 代表一定数量的流量媒介在时间 $t + \theta$ 进入结点 i 的可能性,即 T'_i/T , 其中 $T'_i = \sum_j T_{ji}$, $T = \sum_j T_j = \sum_i T'_i$ 。这样,由信息的定义可知在时间 $t + \theta$ 结点 i 所接受的由结点 j 在时间 t 流出的信息量为 $k \log[p(b_i/a_j)/p(b_i)]$, 即 $k \log(T_{ji}T/T_jT'_i)$, 此即测量出了从一个结点流出的信息对另一个结点的影响。而 $p(a_j, b_i)$ 可用 T_{ji}/T 表示, 因此将用流量表示的概率代入(1)式即可得网络流

平均相互信息为(2)式^[8]。

$$I(A;B) = k \sum_i f_{ij} Q_j \log(f_{ij}/Q_i) \quad (2)$$

式中, $f_{ji} = T_{ji}/T_j$, 表示由 j 室流入 i 室的量占有从 j 室流出的量的份额; $Q_j = T_j/T$, 表示所有从 j 室流出的量占系统总吞吐量的份额; $Q'_i = T'_i/T$, 表示所有流入 i 室的量占系统总吞吐量的份额^[8]。

上升性理论用 Shannon 指数来表达平均相互信息^[9], 但在实际运用中必须考虑其他因素对它的影响, 因此, 通常将 Shannon 指数划分为两部分 $H(A) = I(A;B) + H(A|B)$ ^[9]。 $I(A;B)$ 表示协调一致的、有效的平均相互信息, $H(A|B)$ 则代表无效的、紊乱的无效信息^[9]:

$$H = I(A;B) + H(A|B) = - \sum_j Q_j \log Q_j \quad (3)$$

Ulanowicz 认为用平均相互信息 $I(A;B)$ 更能表达真实的生态系统特性^[10], k 的引入是为了标度参数的尺度^[10], 因此当 k 等于系统吞吐总量 T 时, (2)式可变为(4)式。

$$A = T \times I(A;B) = T \sum_{ij} f_{ij} Q_j \log(f_{ij}/Q_i) \quad (4)$$

式中, A 即 Ulanowicz 定义的上升性^[10], A 是确定系统自身运行活力的关键^[11]。

在(4)式中, 网络流量系统的大小用分室数目 n 和系统总吞吐量 T 表示。由于增长与发展在网络流量系统中可用网络的大小和组织表示, 因此, 可用上升性定量解释增长与发展的关系。

对(4)式变形可得(5)式:

$$A = - T \sum_{ij} Q_j \log Q_j - [- T \sum_{ij} f_{ij} \log(f_{ij} Q_j / Q'_i)] \quad (5)$$

Ulanowicz 进一步定义(5)式右边第一项系统的发展能力(C), 见(6)式。影响发展能力 C 增长的因素是系统总吞吐量 T 和多样性 H ^[11]。

$$C = T \times H = - T \sum_j^n Q_j \log Q_j \quad (6)$$

系统总吞吐量 T 和多样性 H 同时也限制上升性 A 的提高。根据对数函数的凹度, C 、 A 及(5)式右边中括号内的部分均为非负, 可得 $C \geq A \geq 0$, 也就是说, C 可以作为 A 的一个上限。因此, 一个系统的演化总是朝其理论上限 C 的方向发展, 但因各种各样的原因, 上升性和发展能力之间总存在一个差距, 这个差距称为杂项开支(Φ)^[12]。

上升性理论广泛用于定量测定外部干扰对生态系统的影响, 评价生态系统的健康性、整体性以及生态系统的恢复力和协调度等^[8]。J. patricio 利用该理论分析了葡萄牙 Mondego 河口的富营养化问题, 其结果显示富营养化可刺激生态系统总量增长, 但是会降低系统的组织功能而导致的整个系统功能的弱化^[6]。国内文献仅见黄茄莉以甘肃省为例将该理论引入经济系统做了研究^[12], 因此本文拟在这方面做一些尝试。

2 上升性理论在生态经济系统中应用——以重庆市为例

生态经济学认为经济系统只是生态系统的子系统, 经济系统的物质扩张会替换整个系统的其他部分而产生机会成本。当经济系统的规模非常小, 在这种情况下, 环境因子不是稀缺的, 经济扩张的机会成本可以忽略不计, 而在有限而非增长的生态经济系统中经济的持续增长最终会受到环境因子的限制, 其增长的机会成本将非常显著, 因此, 在考虑现实的生态经济活动中必须把传统经济忽视的产业废弃物要素添加进去, 作为生态经济系统计算的不可缺少的因素^[13]。

2.1 重庆市生态经济系统的数据选择与来源

投入产出表包括实物型和价值型两种, 两种投入产出表在应用中存在显著的差异, 且各有千秋^[13], 选择哪一种要视研究的具体情况而定。中国是应用投入产出分析比较晚的国家, 截止目前, 中国编制了 1987、1992、1997、2002 年 4 张基本表, 1990、1995 和 2000 年 3 张延长表。因数据的限制, 本研究参考中国国家统计局国民经济核算司编制的中国区域投入产出表和重庆市统计局编制的重庆市统计年鉴以及中国环境统计

年鉴。

2.2 重庆市生态经济系统的计算方法

投入产出法是美国经济学家列昂惕夫(Wassily W Leontief)于1936年首次提出的一种经济数量分析方法,基于线性数学知识建立数学模型,通过各种系数矩阵描述部门间的各种联系,以棋盘式平衡表的方式反映经济系统中各部门间投入与产出的相互依存关系,用于检验区域经济中各产业的作用。投入产出表通过中间产业的联系追踪经济中各部门之间的影响,近年其在国内外经济研究中广泛应用^[15]。本文采用的环境经济投入产出模型是经济模型的一种延伸,并用此来计算产业废弃物^[14]。

表1 环境经济投入产出模型

Table 1 Model of environmental-economical system base on Input-output analysis

		中间使用 Intermediate use	最终产品及产业废弃物 Final product and industrial waste	总产出 Gross output
中间投入 Intermediate invests	1	$X_{11} X_{12} \cdots X_{1n}$	Y_1	X_1
	...	$\cdots \cdots \cdots \cdots$	$\cdots$	$\cdots$
	n	$X_{n1} X_{n2} \cdots X_{nn}$	Y_n	X_n
初始投入 Initial invests		$V_1 V_2 \cdots V_n$		
总投入 Total invests				
产业废弃物 Industry waste	1	$E_{11} E_{12} \cdots E_{1n}$	R_1	Q_1
	...	$\cdots \cdots \cdots \cdots$	$\cdots$	$\cdots$
	m	$E_{m1} E_{m2} \cdots E_{mn}$	R_n	Q_2

式中, X_{ij} 为第*i*部门产品用于第*j*生产部门生产的数量, E_{ij} 为第*j*部门生产过程中所产生的第*i*种污染物的数量, Y_i 为第*i*部门最终产品数量, X_i 为第*i*部门总产品数量, R_i 为最终需求领域产生的第*i*种污染物的数量, Q_i 为第*i*种污染物总量, V_i 为第*i*部门初始投入数额。

由环境投入产出表得到的各部门产品生产的平衡方程为^[14]:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} + Y_i = X_i \Rightarrow \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + Y_i = X_i \quad i = 1, 2, \cdots, n \tag{7}$$

由环境投入产出表得到的废物产生的平衡方程为^[14]:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} + R_i = Q_i \Rightarrow \sum_{j=1}^n e_{ij} X_j + R_i = Q_i \quad i = 1, 2, \cdots, n \tag{8}$$

式中, $a_{ij} = X_{ij}/X_j$ 是生产部门直接消耗系数, $e_{ij} = E_{ij}/E_j$ 是废物的直接产生系数, 它表示第*j*生产部门单位产值所产生的第*i*种污染物的数量。如果用*A*表示直接消耗系数矩阵, *E*表示污染物直接产生系数矩阵, *Y*、*X*表示最终产品及总产品列向量, *R*、*Q*表示最终需求领域污染物排放列向量和污染物总排放量的列向量^[14], 则可以用矩阵形式表示平衡关系式:

$$AX + Y = X \Rightarrow X = (I - A)^{-1} Y \tag{9}$$

$$EX + R = Q \Rightarrow Q = E(I - A)^{-1} Y + R \tag{10}$$

(10)式表示总的污染排放是总产出的污染排放和最终产品的污染排放之和, 对它求梯度得^[14]:

$$\nabla Q = \nabla E \cdot X + E \cdot \nabla X + \nabla R \tag{11}$$

(11)式等式右边可以表述为系统总吞吐量对环境质量影响的技术效应、规模效应和结构效应。技术效应反映的是经济活动中的技术进步对环境质量的影响。规模效应反映的是经济系统总吞吐量对环境质量的影响, 总吞吐量越大, 污染物产生量越大。结构效应反映的则是不同产业产出份额的变化对环境质量变化的影响^[16]。

2.3 重庆市生态经济系统 1990—2006 年上升性及相关数据计算

根据重庆市 1999 年 6 部门投入产出价值型数据, 可得出 1999 年重庆市的生态经济系统的价值型投入

产出表及其延长表(表2),该表清楚地将流量信息用矩阵形式表达出来。由表2并据 $T = \sum_j T_j = \sum_i T'_i$, 求得重庆市 1999 年系统总吞吐量 T 为 1840.5 亿元;据 $f_{ji} = T_{ji}/T_j$

表2 重庆市 1999 年 6 部门的投入产出表及延长表

Table 2 The I-O and extension I-O table of 6 sectors of Chongqing City in 1999/10⁸yuan

投入 Input _j	产出 Output _i				
	进口 Import	农业 Agriculture	工业 Industry	建筑业 Construction	商业 Commercial
进口 Import	0.00	10.1	88.64	4.30	12.17
农业 Agriculture	0.00	143.06	25.03	24.26	14.26
工业 Industry	0.00	39.33	159.68	30.44	46.68
建筑业 Construction	0.00	48.94	77.92	7.06	41.98
商业 Commercial	0.00	12.19	24.42	7.52	23.73
服务业 Services	0.00	20.98	20.76	15.23	33.29
增加值 Value added	0.00	9.68	82.93	21.49	65.19
最终使用 Final demand	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T_i	0.00	284.28	479.38	110.30	237.3
产业废弃物 Industry waste	0.00	1.97	13.02	2.70	5.70

投入 Input _j	产出 Output _i				
	服务业 Services	产业废弃物 Industry waste	增加值 Value added	最终使用 Final demand	T_j
进口 Import	20.26	0.00	0.00	0.00	135.47
农业 Agriculture	23.67	0.00	0.00	87.51	317.79
工业 Industry	77.53	0.00	0.00	110.87	464.53
建筑业 Construction	20.12	0.00	0.00	57.37	253.39
商业 Commercial	60.72	0.00	0.00	41.43	170.01
服务业 Services	53.13	0.00	0.00	60.09	203.48
增加值 Value added	91.41	0.00	0.00	0.00	270.70
最终使用 Final demand	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T_i	346.84	0.00	0.00	357.27	1815.91
产业废弃物 Industry waste	1.20	0.00	0.00	0.00	24.59

表中 j 和 i 的取值均为 0,1,2,⋯,8;其中,0 代表进口,1—6 依表中顺序代表各个部门,7 代表增加值,8 代表最终使用值

可求得 f_{ji} (表3);据 $Q_j = T_j/T$ 可求得 Q_j ,据 $Q'_i = T'_i/T$ 可求得 Q'_i (表4)。

表3的横行可反映由 j 室流入 i 室的量占有从 j 室流出的量的份额,即各部门及系统总进口和总增加值的使用情况。以工业为例,总供应中 0.334 用于对自身投入,0.079 用于农业,0.305 用于建筑业,0.139 用于商业,0.101 用于其他服务业,0.306 用于最终消费,可见,工业总供应一部分用于最终消费。

表4中, Q_j 表明了从 j 室流出的量在系统总吞吐量中所占的份额, Q'_i 表明了流入 i 室的量在系统总吞吐量中所占的份额。以工业为例,所有从工业部门流出的量占系统总吞吐量的 0.265,所有流入工业部门的量也占系统总吞吐量的 0.265。

本文拟用产业废弃物的总量来表征环境质量状况,故不需列出详细的部门产业废弃物排放量,参照表2再结合(10)式和(11)式可以算出产业废弃物的排放总量,其产业废弃物的排放情况如图1所示

参考表2—表4,根据(2)式可求得平均相互信息为 0.447 比特,据(3)式可求得上升性 A 为 3416.92×10^8 元/(a·比特),根据(5)式可求得发展能力 C 为 4166.98×10^8 元/(a·比特),根据(6)式可求得多样性 H 为 2.242 比特。同理,可求得重庆市生态经济系统 1990,1997,1999,2002 及 2006 年 6 部门作为研究系统时得到的上升性及相关数据(表6)。

3 结果与分析

3.1 重庆市生态经济系统 1990—1999 年间生态经济可持续发展情况

类似生态系统中关于富营养化状态的定义,在生态经济系统中当上升性 A 的增加是由系统总吞吐量 T

的增加及与之相伴随的平均相互信息 I 的降低所引起的,说明系统处于不可持续的发展状态。而当上升性 A 的增加是由系统总吞吐量 T 及平均相互信息 I 的增加共同引起的,则可通过 T 的增加状况来看系统的发展轨迹。

表 3 重庆市 1999 年 7 部门 f_{ij} 值Table 3 The value of f_{ji} of 6 sectors of Chongqing City in 1999

投入 Input _j	产出 Output _i				
	进口 Import	农业 Agriculture	工业 Industry	建筑业 Construction	商业 Commercial
进口 Import	0.000	0.075	0.654	0.032	0.090
农业 Agriculture	0.000	0.450	0.079	0.076	0.040
工业 Industry	0.000	0.082	0.334	0.064	0.098
建筑业 Construction	0.000	0.192	0.305	0.028	0.165
商业 Commercial	0.000	0.069	0.139	0.043	0.135
服务业 Services	0.000	0.103	0.101	0.074	0.163
产业废弃物 Industry waste	0.000	0.106	0.202	0.079	0.264
增加值 Value added	0.000	0.036	0.306	0.079	0.241
最终使用 Final demand	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

投入 Input _j	产出 Output _i			
	服务业 Services	产业废弃物 Industry waste	增加值 Value added	最终使用 Final demand
进口 Import	0.150	0.000	0.000	0.000
农业 Agriculture	0.075	0.000	0.000	0.275
工业 Industry	0.162	0.027	0.000	0.232
建筑业 Construction	0.079	0.007	0.000	0.232
商业 Commercial	0.346	0.032	0.000	0.236
服务业 Services	0.260	0.005	0.000	0.294
产业废弃物 Industry waste	0.056	0.293	0.000	0.000
增加值 Value added	0.338	0.000	0.000	0.000
最终使用 Final demand	0.000	0.000	0.000	0.000

表 4 重庆市 1999 年 7 部门 Q_j 及 Q'_i 值Table 4 The value of Q_j and Q'_i of 6 sectors of Chongqing City in 1999

	进口 Import	农业 Agriculture	工业 Industry	建筑业 Construction	商业 Commercial	服务业 Services	产业废弃物 Industrial waste	增加值 Value added	最终使用 Final demand
Q_j	0.073	0.153	0.265	0.060	0.131	0.187	0.012	0.119	0.000
Q'_i	0.000	0.153	0.265	0.060	0.131	0.187	0.012	0.000	0.192

表 5 重庆市 1990—2006 年 7 部门的上升性及相关数据

Table 5 the ascendancy and relative data of 6 sectors of Chongqing City in 1990—2006

项目 Item	1990	1997	1999	2002	2006
$T/(10^8 \text{ 元/a})$	373.49	1694.45	1840.5	2478.96	4349.45
$I/\text{比特}$	0.447	0.413	0.342	0.395	0.478
$A/(10^8 \text{ 元}/(\text{a 比特}))$	654.95	3062.06	3416.92	4664.43	8556.58
$C/(10^8 \text{ 元}/(\text{a 比特}))$	818.69	3780.32	4166.98	5619.80	10186.41
$H/\text{比特}$	2.192	2.231	2.242	2.267	2.342

各年投入—产出表均来自重庆市统计局;其中计算过程中对数底数均取 2,将平均相互信息用 I 表示,记作 $I = \sum_i f_{ij} Q_j \log(f_{ij}/Q_j)$

但是当用吞吐量评价生态经济系统的运行情况时需考虑当年商品价格及资源使用情况,因此需要将价值型的系统总吞吐量转变为实物型系统总吞吐量。这可以通过将价值型系统总吞吐量乘以该年单位 GDP 能耗得出,详见表 6。由表 6 可见,在 1990—1999 年 10a 间系统实物型总吞吐量从 1516.59 万 t 标准煤/年增加到

2278.42 万 t 标准煤/a;由表 5 系统上升性 A 增加了近 4 倍,而系统的平均相互信息 I 从 1990 年的 0.447 比特降到了 1999 年的 0.342 比特。由上述可见,在 1990—1999 年 10a 间系统上升性的增加是由系统实物型总吞吐量的增加和与之相伴随的平均相互信息的降低所引起。因此,系统处于一种不可持续的发展状态。1990—1999 年 10a 间生态经济系统进化的过程中只注重了增加投入,即仅使系统产生了量的扩张,而没有使系统组织得到改善即没有使系统产生质的变化,仅靠增加投入来提高上升性是不合理的,是不可持续的。

表 6 系统总吞吐量从价值型到实物型的转化

Table 6 The conversion of system though put from value representation to material representation

项目 Item	1990	1997	1999	2002	2006
能源消费总量(万 t 标准煤)	1516.59	2013.13	2278.42	2563.05	3881.52
GDP	299.82	1360.24	1491.99	1990.01	3491.57
T	507.30	1551.73	2219.57	2985	5974.9
能源消费总量/GDP(万 t 标准煤/亿元)	5.058	1.75	1.527	1.287	1.112
T 能源消费总量/GDP(万 t 标准煤/a)	2565.92	2715.53	3389.28	3844.38	6644.09

表中能源消费总量和 GDP 数据来自重庆统计年鉴

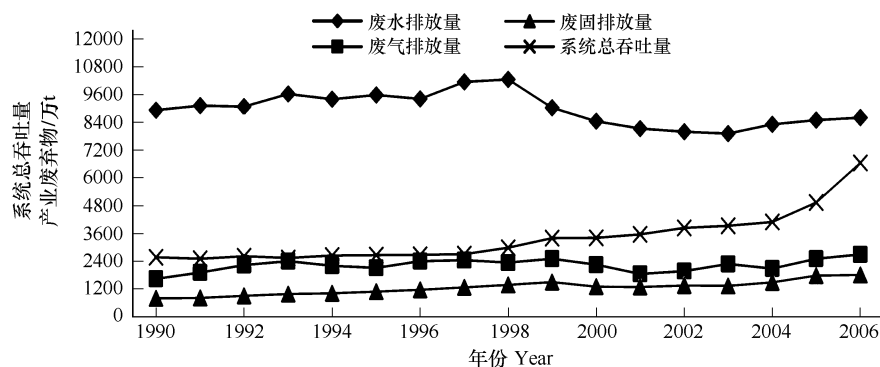


图 1 重庆市生态经济系统中实物型总吞吐量和环境污染水平变化趋势

Fig.1 Trend of material though put and environmental pollution in Chongqing ecological-economics System

在 1999—2006 年 7a 间,系统实物型总吞吐量 T 仍不断增加,从 2278.42 万 t 标准煤/年增加到 3881.52 万 t 标准煤/a,但是增加率从 1990—1999 年间的年均 7.40% 降到了 1999—2006 年间的年均 3.91%,系统的平均相互信息在这 7a 间从 0.342 比特增加到了 0.478 比特。上升性 A 在这 7a 间从 3416.92 亿元/(a·比特)增加到 8556.58 亿元/(a·比特)。在系统实物型总吞吐量和平均相互信息增加的情况下,目前还不能判断该系统是否处于不可持续状态,但可以肯定的是系统实物型总吞吐量增加率的降低及系统平均相互信息的增加表明系统朝着可持续的方向进化。

3.2 重庆市生态经济系统 1999—2006 年所处进化阶段

Ulanowicz 将系统进化的模式分为 4 个阶段:第 1 阶段为增长阶段,由于在这个阶段系统的资源非常丰富,因此系统表现为以最快的速度提高系统总吞吐量。第 2 阶段为发展阶段,在该阶段由于相对可获得资源的降低,系统总吞吐量开始下降。在增长和发展阶段发展能力和上升性都提高,但上升性的增加量不如发展能力大。第 3 阶段为成熟阶段,在此阶段发展能力达到最大值后开始下降,而上升性以减少杂项开支为代价缓慢上升。第 4 阶段为衰老阶段,发展能力和上升性均降低^[7]。

在 1999—2006 年间,重庆市生态经济系统发展能力 C 和上升性 A 一直增加,且发展能力的增加值大于上升性的增加值,并且由表 5 可见,这 7a 间重庆市系统实物型总吞吐量一直不断增加。因此,根据 Ulanowicz 对系统进化的阶段划分,可知重庆市在 1999—2006 年间还处于发展阶段,系统总吞吐量的发展势头逐步减缓。因此,可以提高生态经济系统的平均相互信息及发展能力入手,加强部门之间资源的流通性。生态经济

系统发展能力的提高,由 $C = T \times H$ 可知,在资源受限制情况下要提高生态经济系统的发展能力必须提高系统的多样性^[10]。

3.3 重庆市生态经济系统中实物型系统总吞吐量和环境质量状况变化趋势分析

重庆市经济系统总吞吐量保持快速增长,但必须看到经济系统总吞吐量快速增长的同时,环境质量状况也在相应变化,这里选取废水、废气的排放量来反映生态环境变化情况,固体废物变化率较小,这里不予讨论。由(11)式可知:对于废水排放量来说,随着实物型总吞吐量的扩大,环境质量有不断恶化的趋势,在经济增长中随着产业结构的优化、技术进步水平的提高能够减少实物型总吞吐量对环境质量的负面影响。根据排放量可以划分为两个阶段,第一阶段为 1990—1999 年,这一阶段环境质量变化较为迅速,废气排放量呈上升趋势,废液产生量迅速上升;废水排放年均增长率达 3.2%,废气排放量年均增长 1.1%。第二阶段为 1999—2006 年,这一阶段环境质量有所好转,废气排放量逐步下降,下降速度为 2.5%,废水排放量的变化呈下降趋势,年均下降 3.7%。

4 讨论与结论

上升性理论采用网络流量分析方法既能表达生态经济系统的增长和发展之间的定量关系,又能有效避免模型面临的微观基础问题,有利于提高分析结果的准确性与可靠性。平均相互信息、上升性、发展能力和冗余项可视为分析结构性成分之间相互作用关系的指标,这种分析方式有助于识别生态经济系统的真实发展状况,同时,相比于其他常用研究方法,上升性理论避免了生态足迹方法过分强调人类发展对环境影响的弊端,同时也避免了能值分析方法的能值转换率的确定问题,用不着考虑具体环境的影响因素。但上升性理论的应用受多方面的限制,只有在静态和半静态的流量状态下才可以运用,而真实的生态系统是复杂的和变化的。虽然收集到的数据可以确定系统网络流量的时空数量特征,但很难放映网络系统内部结构特征^[8],因此,本文尝试将投入产出法引入上升性理论来进行生态经济系统的内部结构分析。

本文介绍了上升性理论及其该理论在生态经济系统中的一些应用,并用上升性理论计算了重庆市生态经济系统在 1990—2006 年间的增长与发展及环境质量情况,利用投入产出表的延长表来计算产业废弃物的排放量,并利用产业废弃物的排放量来反映环境质量状况。因为产业产出的变化不仅仅是引起本产业的污染排放的变化,它还会通过投入产出关系而影响到其他各产业的产出与污染排放的变化,进而影响系统吞吐总量与环境质量之间的关系,为此把环境质量变化归因于受系统总吞吐量的规模效应,技术效应和结构效应的共同影响。在这 3 种效应的共同作用下,产业废弃物在不同的时段呈现不同的特征。要使重庆市生态经济系统实现良性发展,需要在系统实物型总吞吐量保持不变或降低的情况下提高生态经济系统的上升性,这可以通过提高资源的利用效率、实现资源的循环利用、提高资源在生态经济各部门之间的流通性及在生态经济部门之间分配的公平性等实现。

References:

- [1] The Group of Sustainable Development Study of Chinese Academy of Science. Report of Sustainable Development of China in 1999. Beijing: Science Press, 2000.
- [2] Chen D J, Xu Z M. Energy analysis of agricultural eco-economic system in arid region of Northwest China — A case study of zhangye prefecture in Heihe river. Journal of Glaciology and Geograpgology, 2002, 24 (4): 374-379.
- [3] Zhang Z Q, Xu Z M. Overall perspective of co-economical theory for sustainable development. China Population, Resources and Environment, 2003, 13 (6): 127-132.
- [4] TAO X Y. Assessment of city's sustainable development based on improved entropy methods. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20 (5): 38-41.
- [5] Xu Z M, Cheng G D, Zhang Z Q. A resolution to the conception of ecological footprint. China Population, Resources and Environment, 2006, 16 (6): 69-78.
- [6] J. patricio Ascendency as an ecological indicator; a case study of estuarine pulse eutrophication. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 60 (1): 23-35.

- [7] Ulanowicz R E. The balance between adaptability and adaptation. *Bio Systems*, 2002, 64(3):13-22.
- [8] Ulanowicz R E. Some steps toward a central theory of ecosystem dynamics. *Computational Biology and Chemistry*, 2003, 27 (1):523-530.
- [9] Ulanowicz R E. Quantitative methods for ecological network analysis. *Computational Biology and Chemistry*, 2004, 28 (3):321-339.
- [10] Ulanowicz R E. Quantifying sustainability: resilience, efficiency and the return of information theory. *Ecological Complexity*, 2009, 6 (2):27-36.
- [11] Ulanowicz R E. Information theory in ecology. *Computers & Chemistry*, 2001, 25 (4): 393-399.
- [12] Huang J L, Xu Z M. The ascendancy formula and its application in economic systems: take Gansu Province as a case study. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (11): 4 785-4792.
- [13] Hu D. From produced(physical) asset to ecosystems asset completeness of asset and capital. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(2):289-295.
- [14] Zhang Y. Application of input-output analysis in environmental economy. *Environmental Economy*, 2000, (11):31-34.
- [15] Shen Y M. Industry relevancy analysis of producer services in China. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(1):821-830.
- [16] Liang L T. The relationship between economic growth and environmental quality — a case study of Jiangsu Province. *Journal of Nanjing Agricultural University (Social Science Edition)*, 2008, 8(1):20-25.

参考文献:

- [1] 中国科学院可持续发展研究组. 1999 年中国可持续发展战略报告. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 陈东景, 徐中民. 干旱区农业生态经济系统的能值分析——以黑河流域中游张掖地区为例. *冰川冻土*, 2002, 24 (4): 374-379.
- [3] 张志强, 徐中民, 程国栋. 可持续发展下的生态经济学理论透视. *中国人口·资源与环境*, 2003, 13 (6): 127-132.
- [4] 陶晓燕. 基于改进熵值法的城市可持续发展能力的评价. *干旱区资源与环境*, 2006, 20 (5):38-41.
- [5] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法的理论解析. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16 (6): 69-78.
- [12] 黄茹莉, 徐中民. 上升性理论及其在经济系统中的应用——以甘肃省为例. *生态学报*, 2007, 27 (11): 4785-4792.
- [13] 胡聃. 从生产资产到生态资产: 资产-资本完备性. *地球科学进展*, 2004, 19 (2):289-295.
- [14] 张越. 环境经济投入产出模型的应用发展. *环境经济*, 2000, 20(2):31-34.
- [15] 申玉铭. 中国生产性服务业产业关联效应分析. *地理学报*, 2007, 62(8):821-830.
- [16] 梁流涛. 经济增长与环境质量关系研究——以江苏省为例. *南京农业大学学报(社会科学版)*, 2008, 8(1):20-25.