

顺德产业生态系统能值动态分析

陆宏芳¹, 陈烈³, 林永标¹, 彭少麟^{2*}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中山大学生物防治国家重点实验室, 广州 510275;

3. 中山大学规划设计研究院, 广州 510275)

摘要:虽然当前的产业生态学研究多集中于生产线、企业和产业生态园尺度,但城市无疑是产业系统基本组合单元,城市区域尺度的产业生态学研究是产业生态学研究尺度上推的必经阶段。我国产业生态系统及城市化进程的空间分布不均,以顺德等为代表的东南沿海市(县)产业生态系统的发展历程对中西部地区有拉动和借鉴的双重作用。以能值理论方法为基础,结合环境经济学和区域经济学方法,从系统开放性、本土性、闭路循环性和经济性 4 个方面,投入和产出端 2 个角度,对顺德市产业生态系统改革开放 22a 的发展动态进行分析研究。结果发现,22a 系统能值总用量增加 15.65 倍,能值密度增加 16.31 倍,人均能值使用强度增加 9.70 倍,外部不可更新资源用量增加 16.32 倍。能值废弃率在 20 世纪 80 年代不断上升而在 90 年代迅速下降,但环境负载率则表现为无规律的波动状态。20 世纪 90 年代,系统能值出口率上升至 1978 年的 4.10 倍,但能值交换率小于 1。结果表明,改革开放 22a,顺德产业生态系统自组织能力明显提高,土地资源利用率不断提高,但系统对周边负熵资源,尤其是不可更新资源的依赖性不断提高,人力资源生产力水平提高相对较慢。20 世纪 90 年代污染物处理产业发展迅速,但在系统资料消耗端的绿色化方面则无显明进展。系统对不可更新资源的利用效率不高,产出商品在市场交换中处于表面繁荣背景下的生态经济不利地位。系统已到了向知识密集型发展道路转变的拐点域。能值理论方法与环境经济学和区域经济学分析的整合可以满足产业生态系统分析评价要求,针对产业生态系统特点,进行多尺度、多方面联立评价,实现系统发展现状、动态与动因的整合分析,对产业生态系统优化点的发现与优化方向的确定有直接的意义。

关键词:城市产业生态系统;区域影响;能值效益

文章编号:1000-0933(2005)09-2188-09 **中图分类号:**Q148 **文献标识码:**A

Emergy synthesis of the dynamics of the Shunde industrial system

LU Hong-Fang¹, CHEN Lie³, LIN Yong-Biao¹, PENG Shao-Lin² (1. South China Botany Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Ecology and Evolution Institute, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China; 3. Planning Design & Research Institute, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2188~2196.

Abstract: Most past studies in industrial ecology have been at the scale of the product production line, factory, or industrial eco-park. However, the activities of industrial systems are combined and regulated at the scale of the urban environment. Therefore, a study of the ecology of the urban environment is essential to understand the dynamics of industrial systems. One of the characteristics of Chinese industrialization and urbanization is its unbalanced spatial distribution. The dynamic development process of urban industrial ecosystems in the southeast area of China has both promoted and served as a reference

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30170147, 3027028);广东省自然科学基金资助项目(04002319);中国科学院华南植物研究所所长基金资助项目

收稿日期:2005-03-08; **修订日期:**2005-06-20

作者简介:陆宏芳(1976~),女,山东威海人,博士,副研究员,从事生态系统生态学和生态经济研究。E-mail: luhf@scbg.ac.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lsspsl@zsu.edu.cn

致谢:感谢顺德市国土局马锦文先生及顺德市统计局、环保局、工业局、农业局、建设局、经贸局等有关部门同志在案例数据采集和调查中给予的大力支持;感谢美国联邦环保局大西洋生态区国家健康与环境影响研究实验室 Daniel E. Campbell 教授在英文摘要的撰写和新指标命名方面给予的帮助和建议

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30170147, 3027028), Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 04002319), Director Foundation of South China Institute of Botany

Received date: 2005-03-08; **Accepted date:** 2005-06-20

Biography: LU Hong-Fang, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in ecosystem ecology and ecological economics. E-mail: luhf@scbg.ac.cn

to guide development in the central and western areas. Twenty-two years of development in the Shunde industrial ecosystem from the enforcement of economic reform and 1978 to 2000 were evaluated using emergy theory and synthesis methods. There are four essential characteristics of industrial ecosystems: (1) recycle of materials, (2) openness to exchange of energy and materials, (3) resulting local effects, and (4) the effects of exchange with larger economies. We evaluated the structure of inputs and outputs to and from the Shunde industrial system within the context of these four aspects of industrial ecosystems. Three new emergy indices were promulgated to integrate the environmental economics of industrial systems with the regional economy. The Foreign Investment Ratio (*FIR*), the Foreign Export Ratio (*FER*) and the intrasystem Emergy Feedback Ratio (*EFR*) were established to fill the need to evaluate the degree of openness characteristic of the urban industrial system (*FIR* and *FER*) and the capacity for self-organization of the urban industrial ecosystem (*EFR*). We found the total emergy use (*U*) and empower density (*ED*) of the Shunde industrial ecosystem increased 15.65 and 16.31 times over the 22 year period of development, while the consumption of nonrenewable indigenous emergy inputs and the emergy use per person increased 16.32 and 9.70 times, respectively. The emergy waste ratio (*EWR*) increased in 1980s', and decreased in 1990s', while the environmental loading ratio (*ELR*) kept varying without clear trends. The EOR increased 4.10 times, while the emergy exchange ratio (*EER*) remained lower than 1 throughout the 22 years. The results show that the self-organization capacity and land use intensity of the Shunde industrial ecosystem increased quickly, while its dependence on nonrenewable indigenous emergy inputs increased even faster. In contrast, the productivity of labor increased more slowly. In the 1990s', industrial waste treatment increased quickly, but a greening trend in the structure of emergy inputs was not found. With relatively lower efficiency in the use of fossil and mineral resources, the Shunde industrial ecosystem has lost access to some resources under prosperous market conditions. At present, the Shunde industrial ecosystem is standing at a turning point on the road that leads from labor intensive development toward technology intensive development. Emergy theory and synthesis methods integrated with environmental and regional economics can fill the need to evaluate industrial ecosystems, and make clear the relationships driving current and past dynamic behavior. Through combining evaluations of multiple scales, the variation in the indices that characterize industrial ecosystems can be examined. Emergy synthesis may be helpful in both evaluation and optimization of urban industrial ecosystems.

Key words: urban industrial ecosystem; regional effects; emergy synthesis

18 世纪兴起的产业革命及其发展在给人类带来无限惊喜的同时,也带来了诸如环境污染、资源危机等一系列苦果。产业的生态化已成为人类社会向可持续发展道路转型的瓶颈和各界关注的焦点。产业生态学应运而生,并先后经历了清洁生产^[1]、产业代谢^[2,3]、和产业生态学^[4~9]等发展阶段,研究视野不断拓宽,研究尺度不断提升。当前的产业生态学研究已发展到从生产技术、流程、企业到区域性产业生态园的各个中、微观尺度。但局部的最优并不等于整体的最优^[10,11]。不可阻挡的城市化进程使城市正日益成为人类产业活动的基本单元,而城市区域尺度的研究也必将成为产业生态学研究尺度提升历程上的下一站。

东部地区是我国参与国际竞争最具优势的地区,其产业转型和发展模式对中西部地区有着直接的带动和借鉴作用。珠江三角洲顺德市是我国最早开展农村体制改革、产权制度改革和行政体制改革和最早发展乡镇企业,走乡村产业化道路的县级市之一。经过 20 多年的努力,顺德已实现初级产业化,财税收入连续 10a 名列全国县级市前两名,1995 年进入“全国综合实力百强县”的前列,1999 年被广东省定为“率先基本实现现代化试点市”^[12]。对这样一个广东省乃至全国的示范县市改革开放 20 余年的发展动态进行客观、量化的生态经济分析、评价研究,对我国城市化进展无疑具有重要的现实意义。

本研究以顺德产业生态系统改革开放 22a 的发展动态为研究对象,基于能值理论方法^[13],分别从产前和产后两个角度,进行系统开放性、本土性、闭路循环性和经济性等 4 个方面的区域能值动态综合分析系统现状及其优化方向,为其他城市产业生态系统的可持续发展提供参考。

1 研究对象

顺德产业生态系统位于广东省珠江三角洲中部,东经 113°1'至 113°23',北纬 22°40'至 23°2'总面积 806.15km²,属于西江和北江下游河网中心的河口冲积平原。区内河流纵横交错,主要河流有 16 条,大小河涌 120 多条,地貌上以基塘平原为主,面积达 570km²,占全市总面积的 70.7%;河流水域面积达 103km²,占 12.8%。在气候带上属副热带海洋季风气候区。冬短夏长,年均气温 21.9℃,年均日照时数 2108h,年平均太阳辐射总量 474.6KJ/cm²,年平均降雨量 1639mm。优越的自然环境条件使得顺德素有鱼类花果之乡的美称。改革开放以来,顺德在我国和广东省率先走农业商品化、集约化道路,基本实现了从传统农业向现代化农业的转变,从种植业为主向养殖业为主的转变,从低值农业向高值农业的转变,建成了全国最大的优质水产、花卉生产基地和

出口基地。在工业方面,顺德目前是全国最大的电风扇、电冰箱、空调、微波炉、燃气具、饲料和家具生产基地,以全国万分之一的土地面积创出了全国 16% 的家电名牌,被誉为“家电王国”^[12]。

2 研究方法

针对产业生态系统闭路循环性、开放性、本土性和经济性特征^[14],及其各自在投入和产出端的分析需要,以及顺德产业生态系统不仅在原料资源和资金的投入上受到周边其他地区的支持,而且受到外资投入影响的特质,本研究在应用现有能值评价指标体系的基础上,将开放性的研究分为国际层面和国家层上两个层次进行,并引入区域经济学评价思路构建了 3 个相应的能值指标,即:

$$\text{外资能值投资率}(FIR) = \frac{\text{年实际利用外资能值}}{\text{当年能值利用总量}} = \frac{FI}{U}$$

$$\text{能值出口率}(FER) = \frac{\text{年出口能值量}}{\text{当年产出的直接市场价值能值}} = \frac{FE}{MV}$$

$$\text{能值内部反馈率}(EFR) = \frac{\text{系统产出能值中反馈自用的能值量}}{\text{当年产出的直接市场价值能值}} = \frac{EF}{MV}$$

外资能值投资率(Foreign Investment Ratio, *FIR*),即系统利用能值总量中外资能值所占的比率,可直观反映系统在投入方面对外资的依赖性;

能值出口率(Foreign export Ratio, *FER*),即系统产出能值中出口国外市场的比率,可用于表达系统能值产出的市场定位和对外界的影响力。受数据限制,本案例中的年出口能值量(Foreign Export, *FE*)是以年出口额和当地人均产品消费额为基础数据,根据当年广东省的能值/货币比率转换而来。能值交换率(*EER*)在实际的市场交易中显有等于 1 的情况,为避免这一误差,本研究采用系统当年产出能值的直接市场价值能值(Direct Market Value, *MV*)作为分母。

能值内部反馈率(Intrasystem Emergy Feedback Ratio, *EFR*),即系统产出能值中反馈回系统内部,以满足自身消费所需的比率,可直观反映系统对于本地福利的影响和系统自组织对于其自身发展的拉动作用。

在时间上,从 1980 年起以 5a 为间隔选取 1980、1985、1990、1995、2000 年 5 个点,辅以 1978 年改革开放起始年和 1992 年邓小平南巡年,共 7 个时间点,对顺德产业生态系统改革开放 22a 来的发展动态进行生态经济分析、评价。在数据获取方面,采用面上调查与随机抽样相结合的方法,主要数据直接来源于政府各部门提供的统计年鉴和各行业、机构报表。部分数据,如本地产业和个人消费品中本地产出的比例等,为研究组成员随机抽样调查所得。

本研究采用 Odum^[13]的全球能流功率基准,即 9.44×10^{24} sej/a。由于可更新自然资源能值投入(*R*)中太阳光能、风能、雨水化学能、雨水势能和地球循环能均是源自同一过程的复合产物,在归并中仅计入其中的最大项,以避免重复计算。不可更新自然资源能值投入量(*N*)以表土损失能值计入。在反馈投入部分,将周转期短于本系统一个生产周期(1a)的农产品投入物质量数据和绿化苗木投资货币量数据经能值转换率和广东省当年能值/货币比转化为能值后进行加和,并入可更新资源反馈投入(*R1*);将各类化肥、农药、化石燃料、金属建材、电力和路桥、建筑的折旧等周转期长于 1a 的消耗量的总能值计为不可更新资源反馈投入(*F*)。具体能值转换率和能值/能值货币比直接引用了 Odum^[13]、隋春花^①和沈善瑞^②的研究成果。4 项投入总计为系统每年的能值总用量(*U*)。产出方面,根据能值理论,系统产出能值(*Y*)等于系统能值总用量(*U*),但由于市场交易中的不对等现象,*Y*在市场上最终实现的直接市场价值(*MV*)往往并不等于 1,两者的比值 *MV/Y*,即系统产出的能值交换率(Emergy Exchange Ratio, *EER*)恰是这种不对等性和系统产出在市场交易中所处地位的直接指示。由于自然资源本身在劳动价值论中被称为“免费的午餐”,在当前的市场交易中多数资源型产品的能值交换率是小于 1 的。正是为了弥补这一价值评价误差,环境经济学的生态系统服务价值评价工作在 20 世纪末成为各界关注的焦点。本文直接引用 Costanza 等^[15]的折算方法计算顺德水体、林地(包括果园)、农田、鱼塘、茨菇藕塘(湿地)的环境服务价值^[15]。废弃物产出方面,引用黄书礼的固体和液体废弃物能值转换率进行折算^③。

3 结果与讨论

原始数据统一转换为能值单位后(附表),简化、归并为投入产出能值流简表(表 1)。将表 1 的能值投入产出数据代入上述能值评价指标的计算公式,即可得到环境负载率、能值产出率、能值投资率等一系列评价顺德市产业生产系统 22a 的能值动态的评价指标值(表 2)。以时间为轴即可在图中直观地看出这些指标 22a 来的变化趋势(图 1)。

① 隋春花. 广州城市生态系统能值分析研究. 华南农业大学硕士论文. 1999

② 沈善瑞. 三水市农业生态经济系统能值分析. 华南农业大学硕士论文. 2001

③ 黄书礼. 生态能观之都市系统进化研究. 蒋经国际学术交流基金会资助研究计划(RG008-D'-92)报告(中国馆). 中兴大学都市计划研究所, 1996, 242

改革开放 22a 中,顺德产业系统在占地面积保持基本稳定的基础上,总能值用量和对外部反馈能值的摄入量持续增加,到 2000 年分别增至 1978 年水平的 16.65 倍和 16.92 倍,表明系统发展程度的不断提高。外部反馈能值中,可更新和不可更新资源能值量分别增至 1978 年水平的 13.32 倍和 17.32 倍,表明系统对于不可更新化石燃料和矿物质的消耗强度和依赖性仍处于上升阶段。虽然 22 年来该城市产业系统在山林和城市园林绿化上的投资力度逐年增加,但并未改变顺德产业系统不可更新资源输入的增长快于可更新资源输入增长速率的趋势。

顺德产业系统废弃能值产出量在 20 世纪 80 年代呈上升趋势,在 20 世纪 90 年代则呈下降趋势,反映该系统 80 年代单纯追求经济发展,90 年代开始逐步重视工业排污的末端治理工作。结合上述资源投入结构的动态变化,表明顺德产业系统环境经济 Kuznets 曲线拐点的到来,仍有待产业结构的调整对于投入结构的改变,从对不可更新资源的大量摄取转向更多依赖可更新资源的投入。

表 1 顺德产业生态系统能值流简表(sej)(1978~2000 年)
Table 1 Emergy flows of industrial ecosystem in Shunde (sej)1978~2000

项目 Item	1978	1980	1985	1990	1992	1995	2000
从业人数(人) Labor (person)	8.23×10 ⁴	8.87×10 ⁴	9.89E+04	1.20×10 ⁵	1.27×10 ⁵	1.10×10 ⁵	1.28×10 ⁵
总面积(m ²) Total area (m ²)	5.23×10 ⁸	5.27×10 ⁸	5.24×10 ⁸	5.29×10 ⁸	5.34×10 ⁸	5.05×10 ⁸	5.03×10 ⁸
利用外资 Foreign investment 投入 Input	0.00	6.54×10 ¹⁸	1.47×10 ²⁰	6.28×10 ²⁰	7.83×10 ²⁰	2.81×10 ²¹	1.32×10 ²¹
本地可更新资源能值投入 R Local renewable input R	6.52×10 ¹⁹	6.57×10 ¹⁹	6.54×10 ¹⁹	6.60×10 ¹⁹	6.66×10 ¹⁹	6.30×10 ¹⁹	6.27×10 ¹⁹
本地不可更新资源能值投入 N Local non- renewable input N	3.88×10 ¹⁸	3.92×10 ¹⁸	3.89×10 ¹⁸	3.93×10 ¹⁸	3.97×10 ¹⁸	3.75×10 ¹⁸	3.73×10 ¹⁸
可更新资源能值反馈投入 R ₁ Feedback renewable input R ₁	3.94×10 ²⁰	4.63×10 ²⁰	7.93×10 ²⁰	3.16×10 ²¹	2.83×10 ²¹	3.65×10 ²¹	5.25×10 ²¹
不可更新资源能值反馈投入 F Feedback non-renewable input F	3.54×10 ²¹	3.46×10 ²¹	1.20×10 ²²	1.27×10 ²²	2.87×10 ²²	2.40×10 ²²	6.13×10 ²²
系统能值使用总量 U Total used emergy U 产出 Output	4.00×10 ²¹	3.99×10 ²¹	1.29×10 ²²	1.59×10 ²²	3.16×10 ²²	2.78×10 ²²	6.66×10 ²²
直接市场价值 MV Direct market value MV	5.12×10 ²¹	4.69×10 ²¹	7.57×10 ²¹	1.21×10 ²²	1.48×10 ²²	1.46×10 ²²	1.99×10 ²²
废弃产出 W Waste W	2.17×10 ²⁰	2.03×10 ²⁰	6.66×10 ²⁰	1.25×10 ²¹	1.02×10 ²¹	8.22×10 ²⁰	6.08×10 ²⁰
供本地消费的产出能值 EF Intra-emergy feedback EF	1.41×10 ²¹	1.53×10 ²¹	2.21×10 ²¹	2.61×10 ²¹	2.85×10 ²¹	2.78×10 ²¹	1.56×10 ²¹
出口国外的产出能值 FE Foreign Export FE	9.56E+20	1.04×10 ²¹	6.67×10 ²⁰	1.37×10 ²¹	6.65×10 ²¹	8.99×10 ²¹	1.53×10 ²²

表 2 顺德产业生态系统能值评价表(1978~2000 年)
Table 2 Emergy evaluation table of Shunde industrial ecosystem 1978~2000

能值指标 Emergy Index	1978	1980	1985	1990	1992	1995	2000
环境负载率 Environment loading ratio (ELR)	7.71	6.55	13.98	3.94	9.88	6.48	11.52
能值产出率 Emergy yield ratio (EYR)	1.02	1.02	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
能值投资率 Emergy investment ratio (EIR)	56.90	56.31	184.71	227.01	446.44	414.79	1001.56
能值交换率 Emergy exchange ratio (EER)	1.28	1.18	0.59	0.76	0.47	0.53	0.30
能值密度 Empower density (ED)	7.65×10 ¹²	7.57×10 ¹²	2.45×10 ¹³	3.01×10 ¹³	5.91×10 ¹³	5.49×10 ¹³	1.32×10 ¹⁴
人均能值使用强度 Emergy per person	4.86×10 ¹⁶	4.50×10 ¹⁶	1.30×10 ¹⁷	1.33×10 ¹⁷	2.49×10 ¹⁷	2.52×10 ¹⁷	5.20×10 ¹⁷
能值废弃率 Emergy waste ratio (EWR)	0.05	0.05	0.05	0.08	0.03	0.03	0.01
能值内部反馈率 Intrasystem emergy feedback ratio (EFR)	0.35	0.38	0.17	0.16	0.09	0.10	0.02
外资能值投资率 Foreign investment ratio (FIR)	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.10	0.02
能值出口率 Foreign export ratio (FER)	0.19	0.22	0.09	0.11	0.45	0.62	0.77

3.1 开放性与本土性分析

3.1.1 投入端分析 在高度依赖社会经济反馈投入、社会经济高度发展的城市产业生态经济系统中,能值投资率比能值产出率具有更高的敏感性。因此,用能值投资率来评价顺德产业系统投入结构中对于社会经济系统反馈性投入的依赖性。在 1978 年至 2000 年顺德产业系统投入构成的评价中,能值产出率和能值投资率的变幅分别为 0.2 和 943.1。以科学计数法保留两位数

计,顺德产业系统的能值产出率在 90 年代一直为 1.00×10^0 ;而其能值投资率则由 1990 年的 227 迅速提升至 2000 年的 1 000。在改革开放的 22a 中,顺德产业系统投入中对于社会经济系统反馈性投入的依赖程度不断攀升,系统受人类的影响和控制程度日深。

自 1978 年到 1995 年产业系统对外资的依赖性不断提高,1995 年外资能值投资率达 10.1%,是 1980 年的 64.33 倍(表 2);1995 年至 2000 年则大幅下降,2000 年的外资利用总量下降为 1995 年水平的 46.98%(表 1),而外资能值投资率则下降至 1.98%,仅为 1995 年水平的 16%(表 2)。表明顺德产业系统社会经济发展程度的提高缩短了它与国外发达地区的差异,外资吸引力相应有所下降,但经过 17a 改革开放的发展积累,系统自组织能力得以提高,顺德产业生态系统依靠自身财力从外部获取负熵以维持和提高自身稳定和进化的自组织能力得到显著提高。这一点从“九五”期间系统能值使用总量的大幅增加及外资利用总量上升而外资依赖率下降幅度的差异上得以清晰表现。

虽然顺德产业系统经过 17a 引进外资的协同发展后,自身资金财富得到大幅上升,并在 1996~2000 年逐渐成为系统摄取外界资源能值投入的主体力量,但系统能值投资率的持续上升,表明顺德产业系统的发展越来越依赖于对周边地区资源能值的支撑。

3.1.2 产出端分析 20 世纪 80 年代,顺德产业生态系统产出能值的出口率一直在 20% 以下浮动,在 90 年代大幅度上升,在 2000 年达到 76.6%,是 1978 年水平的 4.10 倍,而产出能值中供顺德自用的内部反馈比率则在小幅波动中持续由 1978 年的 3.51% 降至 2000 年的 2.34%。系统总能值产出减去出口能值和自用能值后即为供国内其他地区使用的产出能值。由此两指标的动态可知,顺德产业能值产出对于外界的影响在 80 年代主要集中于国内市场,而在 90 年代逐渐转向国际市场,系统对产出端的对外影响力不断扩大。

3.2 闭路循环性分析

3.2.1 消耗端分析 环境负载率,即系统不可更新资源投入能值与可更新自然资源能值之比,可从资源消耗结构上衡量目标系统的环境压力。1978 年至 2000 年的 22a 间,顺德产业生态系统的环境负载率围绕 8.28 在上下 4.34 的范围内波动,未显示出明显的连续变化趋势。表明,从资源和能值的消耗结构看,顺德产业系统对当地环境所造成的压力没有随着其产业系统的发展而持续上升,但在资源消耗端的原材料绿色化方面亦尚未取得明显进展。

3.2.2 排放端分析 依据生态学价值观,任何自然界的物质和能量都是有价值的,都会被其接收者所利用。自然界中没有废弃与污染的概念。但由于人类认知的有限性,产业生态系统往往不能充分利用所有的资源和能源性投入,而产生大量“不可利用的”物质和能量。由系统排放的废弃能值除以系统总能值用量而得的能值废弃率,无疑是衡量产业系统资源和能源利用率的直接而有效的尺度。由表 2 可知,顺德产业系统的能值废弃率在 20 世纪 80 年代不断上升,到 1990 年已升至 1978 年水平的 1.45 倍。而在 90 年代迅速下降,至 2000 年已降至 1990 年水平的 11.60%。表明顺德产业系统在 80 年代走的是数据扩充的规模化发展道路,资源利用效率不高。而 90 年代则通过企业内部和城市尺度渐渐开始一系列环保措施,显著降低了产出端的环境压力,污染物处理产业发展迅速,为资源的回收利用和系统闭路循环性的提高打下了基础。

直接而有效的尺度。由表 2 可知,顺德产业系统的能值废弃率在 20 世纪 80 年代不断上升,到 1990 年已升至 1978 年水平的 1.45 倍。而在 90 年代迅速下降,至 2000 年已降至 1990 年水平的 11.60%。表明顺德产业系统在 80 年代走的是数据扩充的规模化发展道路,资源利用效率不高。而 90 年代则通过企业内部和城市尺度渐渐开始一系列环保措施,显著降低了产出端的环境压力,污染物处理产业发展迅速,为资源的回收利用和系统闭路循环性的提高打下了基础。

3.3 经济性分析

3.3.1 资源利用端分析 能值密度和人均能值使用强度同是评价系统资源利用效率的指标,只是侧重点有所不同。联立两者可以在评价系统发展程度的同时,根据两者变幅的差异来考查当前产业转型期系统内劳动密集型产业向知识密集型产业转移的程度。1978 年至 2000 年顺德产业生态系统单位面积的能值使用强度增加了 16.31 倍,而人均能值使用强度只增加了 9.70 倍,结合能值投资率 16.57 倍的增幅和环境负载率的无规律变化,表明在改革开放的 22a 中,顺德产业发展走的是劳动密集型的道路,外部不可更新资源的利用效率没有明显提高,系统向知识密集型产业转移的脚步有待加快。

3.3.2 产出外销端分析 受认知不完全性的约束,人类当前的价值观整体而言,仍是以市场为媒介的经济价值观,这种价值观向生态经济价值观的转变道路依然漫长。在这种背景之下,系统产出的能值价值与其市场价值往往并不相等。

22a 来,顺德产业系统产出能值的能值交换率基本呈下降趋势。1978 年到 1980 年期间的能值交换率大于 1,表示当时的顺德产业系统通产出在市场上所能换取的能值价值高于其能值成本,系统通过市场交换获得正的生态经济利润。1985 年至 2000

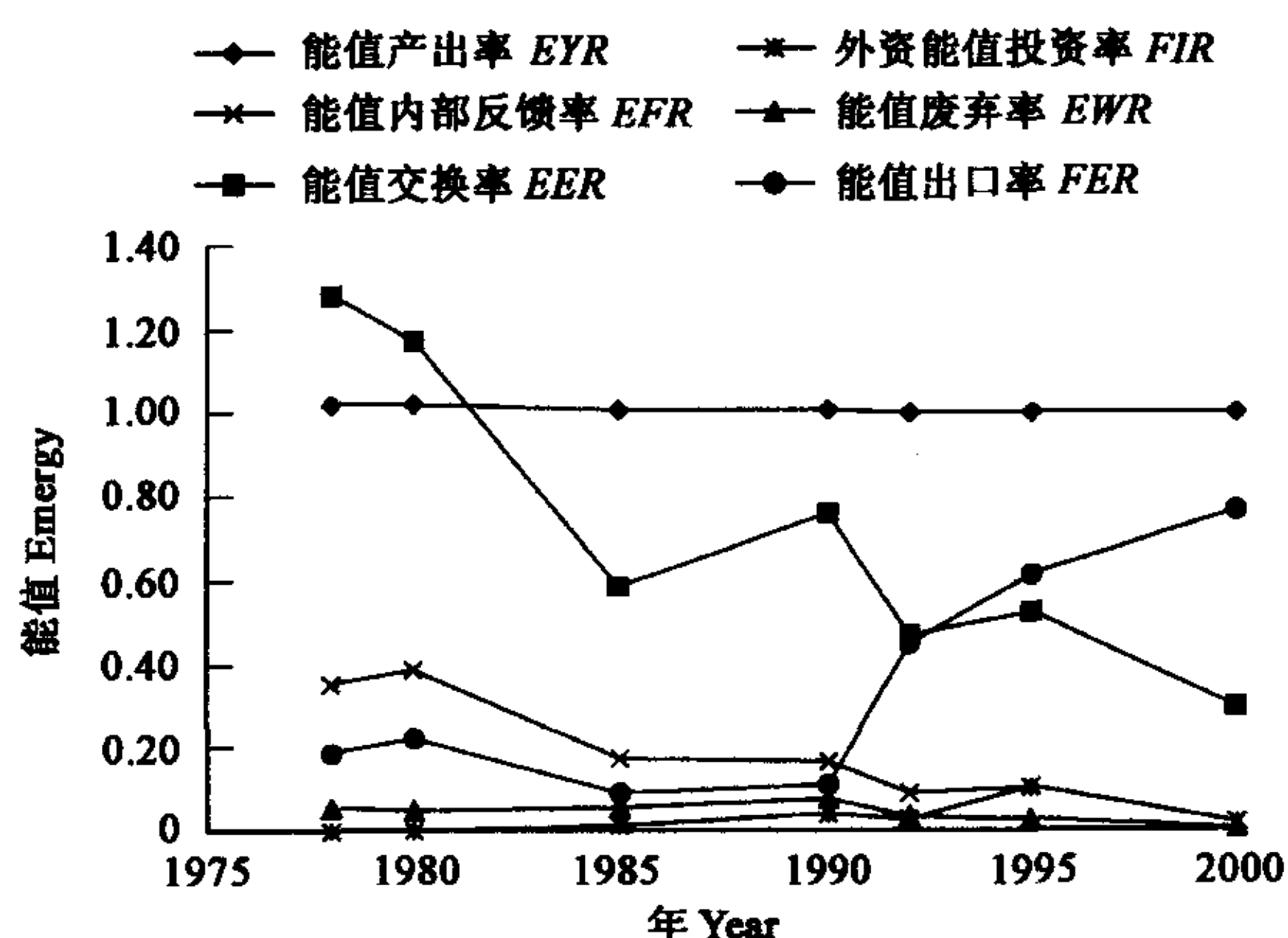


图 1 顺德市产业系统 22a 能值动态评价

Fig. 1 Emergy evaluation on 22 years' dynamic of Shende industrial ecosystem

年的能值交换率小于 1,表明顺德产业系统在这一时期的能值交换中实际处于亏损状态,在商品的对外交换的表面繁荣背景下处于生态经济的不利地位。分析其概因,是由于 20 世纪 80 年代中期以后工业的兴起和化石农业的发展消耗了大量高能值的矿产、石化原料,且走的是劳动密集型制造、加工工业发展道路,商品附加值不高。就生态经济成本价值而言,石化原料具有极高的能值价值,因为它们的形成耗费大自然成百甚至上千年的时间,但在传统经济学的价值观中,这部分价值却被视为“无价值的免费午餐”,从而未记入成本核算中去,这也是市场国际化情况下,发达国家掠夺发展中国家财富的一种“合法”手段和发展中国家产业发展过程中必然经历的初始阶段。提高自身产品中的技术和科技含量,尽快实现从劳动密集型的规模扩展向知识密集型的集约发展转型是顺德产业生态系统当前要解决的关键问题。

4 结论

顺德产业生态系统经过 22a 改革开放的发展积累,系统自组织能力明显提高,并在“九五”期间成为从系统外部获取负熵的主体力量;土地、人力资源利用率不断提高,但系统对周边负熵资源,尤其对不可更新资源的依赖性仍不断增强,污染物处理产业发展迅速但原材料绿色化方面则无明显进展,且系统对不可更新资源的利用效率不高,产出商品在对外交易中处于表面繁荣背景下的生态经济不利地位,系统已到了向知识密集型发展道路转变的拐点域。

受统计数据和能值转换率库源所限,本研究仅计入了工业和第三产业的固体和液体废弃排放能值,因而能值废弃率在此案例中评价能值利用率时具有一定程度上的不完整性,但用于系统动态规律分析时,对比数据口径一致,仍可反映系统变化情况。

能值理论与方法与区域经济学分析思路的整合可以满足产业生态系统分析评价要求,能够针对产业生态系统特点,进行多尺度、多方面联立评价,实现系统发展现状、动态与动因的整合分析,对产业生态系统优化点的发现与优化方向的确定有直接的意义。

References:

- [1] Wang S L, Wu S H, Wan R, et al. *Cleaning Production Theory and Practice*. Beijing: Chinese Machine Publishing. 2002. 11~13
- [2] Ayres R U. Industrial metabolism. In: Ausubel JH, Wladovich HE, etitor. *Technology and the environment*. Washington (DC): National Academy Press, 1989.
- [3] Frosch R A, Gallopoulos N. Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 1989, **261**(3): 94~102.
- [4] Hao X B. Basic Theory and Practice Introduction of Industrial Ecology. *Taiyuan Sciences and Technology*, 2000, **3**: 1~2, 4.
- [5] Robert F, Nicolas G. Sustainable development strategy of industry development. *American Scientists*, 1989, **9**: 106~115.
- [6] Allenby B R, Richards D J. *The Greening of Industrial Ecosystems*. Washington DC: National Academy Press. <http://www.nap.edu/openbook>, 1994.
- [7] Yang J X, Wang R S. Theory and methodology of industrial ecology. *Urban Environment & Urban Ecology*, 1998, **11**(2): 56~66.
- [8] Deng N S, Wu F. *Industrial Ecology-theory and application*. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. 382~383.
- [9] Yang J X, Wang R S. Retrospect and prospect of industrial ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, **9**(5): 555~561.
- [10] Gnauck A. Fundamentals of ecosystem theory from general systems analysis. In: Jorgensen S E, Muller F (Eds.). *Handbook of Ecosystem Theories and Management*. New York: CRC Press LLC, 2000. 75~88.
- [11] Xu G Z, Gu J F, Che H A. *Systems Science*. Shanghai Technology and Education Press, 2000. 17~23.
- [12] Chen L, Liu F Y, Qiao S, et al. *Study of Sustainable development of Shunde city, Chinese developed area*. Guangzhou: Guangdong Technology and Sciences Press, 2002.
- [13] Odum H T. *Environmental Accounting: Emergy and Decision Making*. New York: John Wiley & Sons, 1996. 57~58, 85~86.
- [14] Peng S L, Lu H F. A new idea about industrial ecology. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, **23**(4): 127~130.
- [15] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **387**: 253~260.

参考文献:

- [1] 王守兰,武少华,万融,等. 清洁生产理论与实务. 北京:机械工业出版社,2002. 11~13.
- [4] 郝新波. 工业生态学基本理论及其应用初探. 太原科技,2000, **3**: 1~2, 4.
- [7] 杨建新,王如松. 产业生态学基本理论探讨. 城市环境与城市生态,1998, **11**(2): 56~66.
- [8] 邓南圣,吴峰. 工业生态学——理论与应用. 北京:化学工业出版社,2002. 382~383.
- [9] 杨建新,王如松. 产业生态学的回顾与展望. 应用生态学报,1998, **9**(5): 555~561.
- [11] 许国志,顾基发,车宏安. 系统科学. 北京:上海科技教育出版社,2000. 17~23.
- [12] 陈烈,刘复友,乔森,等. 中国发达地区顺德市域可持续发展研究. 广州:广东科技出版社,2002.
- [14] 彭少麟,陆宏芳. 产业生态学的新思路. 生态学杂志,2004, **23**(4): 127~130.

附表 1978 至 2000 年顺德产业生态系统能值动态分析表

项目	原始数据						能值转换率*					太阳能值				
	1978	1980	1985	1990	1992	1995	2000	1978	1980	1985	1990	1992	1995	2000		
可更新资源能值投入																
太阳能(J)	2.28×10 ¹⁸	2.30×10 ¹⁸	2.28×10 ¹⁸	2.30×10 ¹⁸	2.32×10 ¹⁸	2.20×10 ¹⁸	2.19×10 ¹⁸	1.00×10	2.28×10 ¹⁸	2.30×10 ¹⁸	2.28×10 ¹⁸	2.32×10 ¹⁸	2.20×10 ¹⁸	2.19×10 ¹⁸		
风能(J)	4.33×10 ¹⁵	4.37×10 ¹⁵	4.34×10 ¹⁵	4.38×10 ¹⁵	4.42×10 ¹⁵	4.18×10 ¹⁵	4.16×10 ¹⁵	6.63×10 ²	2.87×10 ¹⁸	2.90×10 ¹⁸	2.88×10 ¹⁸	2.93×10 ¹⁸	2.77×10 ¹⁸	2.76×10 ¹⁸		
雨水化学能(J)	4.23×10 ¹⁵	4.27×10 ¹⁵	4.24×10 ¹⁵	4.28×10 ¹⁵	4.32×10 ¹⁵	4.09×10 ¹⁵	4.07×10 ¹⁵	1.54×10 ⁴	6.52×10 ¹⁹	6.57×10 ¹⁹	6.54×10 ¹⁹	6.66×10 ¹⁹	6.30×10 ¹⁹	6.27×10 ¹⁹		
雨水势能(J)	3.36×10 ¹³	3.39×10 ¹³	3.37×10 ¹³	3.40×10 ¹³	3.43×10 ¹³	3.25×10 ¹³	3.23×10 ¹³	8.89×10 ³	2.99×10 ¹⁷	2.99×10 ¹⁷	2.99×10 ¹⁷	3.05×10 ¹⁷	2.89×10 ¹⁷	2.87×10 ¹⁷		
地球循环能(J)	7.58×10 ¹⁴	7.65×10 ¹⁴	7.60×10 ¹⁴	7.67×10 ¹⁴	7.74×10 ¹⁴	7.33×10 ¹⁴	7.29×10 ¹⁴	2.90×10 ⁴	2.20×10 ¹⁹	2.22×10 ¹⁹	2.20×10 ¹⁹	2.25×10 ¹⁹	2.12×10 ¹⁹	2.11×10 ¹⁹		
R 小计								6.52×10 ¹⁹	6.57×10 ¹⁹	6.54×10 ¹⁹	6.60×10 ¹⁹	6.66×10 ¹⁹	6.30×10 ¹⁹	6.27×10 ¹⁹		
当地不可更新自然资源能值投入																
表土层损失能(J)	6.21×10 ¹³	6.27×10 ¹³	6.23×10 ¹³	6.29×10 ¹³	6.35×10 ¹³	6.01×10 ¹³	5.98×10 ¹³	6.25×10 ⁴	3.88×10 ¹⁸	3.92×10 ¹⁸	3.89×10 ¹⁸	3.97×10 ¹⁸	3.75×10 ¹⁸	3.73×10 ¹⁸		
可更新反馈投入																
稻种(kg)	5.46×10 ⁶	4.67×10 ⁶	3.99×10 ⁶	4.22×10 ⁶	3.26×10 ⁶	1.20×10 ⁶	6.42×10 ⁴	1.29×10 ¹²	7.05×10 ¹⁸	6.03×10 ¹⁸	5.15×10 ¹⁸	4.21×10 ¹⁸	1.55×10 ¹⁸	8.28×10 ¹⁶		
小麦(kg)	8.86×10 ⁵	1.63×10 ⁵						1.38×10 ¹²	1.22×10 ¹⁸	2.26×10 ¹⁷	0.00×10	0.00×10	0.00×10	0.00×10		
玉米种(kg)	5.30×10 ⁴	4.60×10 ⁴	5.90×10 ³	9.49×10 ³	1.08×10 ⁴	4.04×10 ⁴	2.38×10 ⁴	1.38×10 ¹²	7.31×10 ¹⁶	6.35×10 ¹⁶	8.14×10 ¹⁵	1.31×10 ¹⁶	1.48×10 ¹⁶	5.57×10 ¹⁶	3.29×10 ¹⁶	
红绿豆种(kg)	3.59×10 ⁴	4.24×10 ⁴	6.91×10 ⁴	4.88×10 ⁴	3.25×10 ⁴	1.87×10 ⁴	8.90×10 ²	9.94×10 ¹²	3.57×10 ¹⁷	4.22×10 ¹⁷	6.87×10 ¹⁷	4.85×10 ¹⁷	3.23×10 ¹⁷	1.86×10 ¹⁷	8.85×10 ¹⁵	
番薯种(kg)	1.93×10 ⁵	1.32×10 ⁵	9.67×10 ⁴	4.21×10 ⁴	5.85×10 ⁴	2.19×10 ⁵	5.82×10 ⁴	6.94×10 ¹⁰	1.34×10 ¹⁶	9.15×10 ¹⁵	6.71×10 ¹⁵	2.92×10 ¹⁵	4.06×10 ¹⁵	1.52×10 ¹⁶	4.04×10 ¹⁵	
马铃薯种(kg)	1.73×10 ³	1.14×10 ³	6.83×10 ³	1.13×10 ⁴	1.01×10 ⁴	5.59×10 ⁴	9.93×10 ³	6.94×10 ¹⁰	1.20×10 ¹⁴	7.91×10 ¹³	4.74×10 ¹⁴	7.81×10 ¹⁴	6.99×10 ¹⁴	3.88×10 ¹⁵	6.89×10 ¹⁴	
大豆种(kg)	1.39×10 ⁵	1.50×10 ⁵	5.91×10 ⁴	2.94×10 ⁴	1.67×10 ⁴	5.48×10 ³	1.79×10 ³	9.94×10 ¹²	1.38×10 ¹⁸	1.50×10 ¹⁸	5.88×10 ¹⁷	1.66×10 ¹⁷	5.44×10 ¹⁶	1.78×10 ¹⁶		
甘蔗种茎(kg)	2.44×10 ⁷	2.35×10 ⁷	2.75×10 ⁷	1.93×10 ⁷	1.29×10 ⁷	2.42×10 ⁶	2.95×10 ⁵	6.94×10 ¹⁰	1.70×10 ¹⁸	1.63×10 ¹⁸	1.91×10 ¹⁸	8.96×10 ¹⁷	1.68×10 ¹⁷	2.04×10 ¹⁶		
花生种(kg)	3.81×10 ⁵	5.43×10 ⁵	2.74×10 ⁵	7.63×10 ⁴	4.26×10 ⁴	1.58×10 ⁴	3.04×10 ³	2.67×10 ¹²	1.02×10 ¹⁸	1.45×10 ¹⁸	7.32×10 ¹⁷	2.04×10 ¹⁷	4.22×10 ¹⁶	8.12×10 ¹⁵		
农间苗木(¥)	6.77×10 ⁶	1.17×10 ⁷	2.91×10 ⁷	4.87×10 ⁷	6.81×10 ⁷	1.41×10 ⁸	1.82×10 ⁸	能值货币比 7.29×10 ¹⁹ 1.03×10 ²⁰ 1.46×10 ²⁰ 1.33×10 ²⁰ 1.36×10 ²⁰ 1.24×10 ²⁰ 1.08×10 ²⁰								
蔬菜种(kg)	2.00×10 ⁴	1.93×10 ⁴	1.87×10 ⁴	3.20×10 ⁴	3.77×10 ⁴	1.88×10 ⁵	5.20×10 ⁴	3.98×10 ¹⁴	7.95×10 ¹⁸	7.67×10 ¹⁸	7.45×10 ¹⁸	1.27×10 ¹⁹	1.50×10 ¹⁹	7.46×10 ¹⁹	2.07×10 ¹⁹	
黑麦草种(kg)	2.59×10 ⁴	2.60×10 ⁴	6.45×10 ⁴	1.01×10 ⁵	1.13×10 ⁵	1.63×10 ⁵	1.43×10 ⁵	4.49×10 ¹²	1.16×10 ¹⁷	1.17×10 ¹⁷	2.89×10 ¹⁷	4.55×10 ¹⁷	5.07×10 ¹⁷	7.32×10 ¹⁷	6.42×10 ¹⁷	
猪仔(kg)	2.47×10 ⁶	3.28×10 ⁶	3.93×10 ⁶	5.87×10 ⁶	6.69×10 ⁶	6.69×10 ⁶	5.19×10 ⁶	5.01×10 ¹³	1.24×10 ²⁰	1.65×10 ²⁰	1.97×10 ²⁰	2.94×10 ²⁰	3.35×10 ²⁰	3.35×10 ²⁰	2.60×10 ²⁰	
鸡仔(kg)			1.99×10 ³	8.06×10 ³	1.81×10 ⁴	1.81×10 ⁴	2.02×10 ⁴	8.96×10 ¹²	0.00×10	0.00×10	1.79×10 ¹⁶	7.22×10 ¹⁶	1.62×10 ¹⁷	1.62×10 ¹⁷	1.81×10 ¹⁷	
鸭仔(kg)	8.70×10 ²	1.13×10 ³	5.14×10 ²	1.00×10 ³	5.27×10 ²	5.27×10 ²	5.70×10 ²	9.21×10 ¹²	8.01×10 ¹⁵	1.04×10 ¹⁶	4.74×10 ¹⁵	9.23×10 ¹⁵	4.85×10 ¹⁵	4.85×10 ¹⁵	5.25×10 ¹⁵	
鹅仔(kg)			1.55×10 ²	1.68×10 ²	1.28×10 ²	1.28×10 ²	4.42×10 ¹	1.23×10 ¹³	0.00×10	0.00×10	1.91×10 ¹⁵	2.06×10 ¹⁵	1.58×10 ¹⁵	1.58×10 ¹⁵	5.44×10 ¹⁴	
鱼苗(kg)	4.95×10 ⁶	4.96×10 ⁶	6.35×10 ⁶	6.67×10 ⁶	7.88×10 ⁶	1.31×10 ⁷	1.37×10 ⁷	1.25×10 ¹³	6.19×10 ¹⁹	6.20×10 ¹⁹	7.94×10 ¹⁹	8.33×10 ¹⁹	9.86×10 ¹⁹	1.64×10 ²⁰	1.71×10 ²⁰	
牛犊(kg)	4.84×10 ⁴	4.37×10 ⁴	2.18×10 ⁴	3.94×10 ³	2.22×10 ³	5.90×10 ²	2.00×10 ²	5.19×10 ¹³	2.51×10 ¹⁸	2.27×10 ¹⁸	1.13×10 ¹⁸	2.05×10 ¹⁷	1.15×10 ¹⁷	3.06×10 ¹⁶	1.04×10 ¹⁶	
花生秧(kg)	1.24×10 ⁸	1.24×10 ⁸	1.27×10 ⁸	1.47×10 ⁸	1.58×10 ⁸	1.84×10 ⁸	1.91×10 ⁸	1.37×10 ¹¹	1.69×10 ¹⁹	1.70×10 ¹⁹	1.74×10 ¹⁹	2.01×10 ¹⁹	2.17×10 ¹⁹	2.52×10 ¹⁹	2.62×10 ¹⁹	

续表

茶麸(kg)	1.24×10 ⁶	1.24×10 ⁶	1.27×10 ⁶	1.60×10 ⁶	1.64×10 ⁶	2.04×10 ⁶	2.12×10 ⁶	6.99×10 ¹¹	8.65×10 ¹⁷	8.67×10 ¹⁷	8.88×10 ¹⁷	1.12×10 ¹⁸	1.15×10 ¹⁸	1.43×10 ¹⁸	1.49×10 ¹⁸
青饲料(kg)	8.66×10 ⁷	8.68×10 ⁷	8.89×10 ⁷	1.01×10 ⁸	1.04×10 ⁸	1.23×10 ⁸	1.27×10 ⁸	4.22×10 ¹¹	3.66×10 ¹⁹	3.67×10 ¹⁹	3.75×10 ¹⁹	4.28×10 ¹⁹	4.39×10 ¹⁹	5.18×10 ¹⁹	5.39×10 ¹⁹
黄粉(kg)	1.24×10 ⁸	1.24×10 ⁸	1.27×10 ⁸	1.47×10 ⁸	1.58×10 ⁸	1.84×10 ⁸	1.91×10 ⁸	4.57×10 ¹¹	5.65×10 ¹⁹	5.67×10 ¹⁹	5.80×10 ¹⁹	6.70×10 ¹⁹	7.24×10 ¹⁹	8.41×10 ¹⁹	8.74×10 ¹⁹
饲料(kg)			5.62×10 ⁷	3.36×10 ⁸	1.08×10 ⁷	0.00×10	0.00×10	1.31×10 ¹²	0.00×10	0.00×10	7.36×10 ¹⁹	4.40×10 ²⁰	1.41×10 ¹⁹	0.00×10	0.00×10
饲料用玉米(t)			2.92×10 ⁴	1.50×10 ⁵	3.76×10 ⁵	5.02×10 ⁵	8.12×10 ⁵	1.38×10 ¹⁵	0.00×10	0.00×10	4.03×10 ¹⁹	2.07×10 ²⁰	5.19×10 ²⁰	6.92×10 ²⁰	1.12×10 ²¹
饲料用粹米(t)			1.46×10 ⁴	7.51×10 ⁴	1.88×10 ⁵	2.51×10 ⁵	4.06×10 ⁵	1.29×10 ¹⁵	0.00×10	0.00×10	1.88×10 ¹⁹	9.69×10 ¹⁹	2.42×10 ²⁰	3.24×10 ²⁰	5.24×10 ²⁰
饲料用豆粕(t)			7.29×10 ³	3.76×10 ⁴	9.39×10 ⁴	1.25×10 ⁵	2.03×10 ⁵	9.94×10 ¹⁵	0.00×10	0.00×10	7.25×10 ¹⁹	3.73×10 ²⁰	9.34×10 ²⁰	1.25×10 ²¹	2.02×10 ²¹
饲料用鱼粉(t)			2.43×10 ³	1.25×10 ⁴	3.13×10 ⁴	4.18×10 ⁴	6.76×10 ⁴	1.25×10 ¹⁶	0.00×10	0.00×10	3.04×10 ¹⁹	1.56×10 ²⁰	3.91×10 ²⁰	5.23×10 ²⁰	8.46×10 ²⁰
稻谷(t)	0.00×10	0.00×10	0.00×10	9.48×10 ⁵	0.00×10	0.00×10	1.31×10 ⁴	1.29×10 ¹⁵	0.00×10	0.00×10	0.00×10	1.22×10 ²¹	0.00×10	0.00×10	1.69×10 ¹⁹
蚕茧(t)	0.00×10	0.00×10	5.62×10 ³	4.70×10 ³	5.56×10 ³	1.01×10 ³	0.00×10	5.08×10 ¹⁴	0.00×10	0.00×10	2.85×10 ¹⁸	2.38×10 ¹⁸	2.82×10 ¹⁸	5.12×10 ¹⁷	0.00×10
林业苗木投资(¥)	4.26×10 ⁴	2.00×10 ⁴	5.00×10 ⁴	1.60×10 ⁵	2.20×10 ⁵	4.00×10 ⁴	5.00×10 ⁴	能值货币比	4.59×10 ¹⁷	1.77×10 ¹⁷	2.52×10 ¹⁷	4.37×10 ¹⁷	4.40×10 ¹⁷	3.54×10 ¹⁶	2.99×10 ¹⁶
园林苗木投资(¥)	2.84×10 ⁴	2.00×10 ⁴	6.62×10 ⁴	4.40×10 ⁵	3.14×10 ⁶	6.53×10 ⁶	5.70×10 ⁶	能值货币比	4.59×10 ¹⁷	1.77×10 ¹⁷	2.52×10 ¹⁷	4.37×10 ¹⁷	4.40×10 ¹⁷	3.54×10 ¹⁶	2.99×10 ¹⁶
R1 小计								3.94×10 ²⁰	6.26×10 ²⁰	7.93×10 ²⁰	3.16×10 ²¹	3.00×10 ²¹	3.65×10 ²¹	5.25×10 ²¹	
不可更新资源反馈投入															
氮肥(t)	4.94×10 ⁴	4.27×10 ⁴	3.46×10 ⁴	4.10×10 ⁴	3.46×10 ⁴	1.91×10 ⁴	1.32×10 ⁴	3.80×10 ¹⁵	1.88×10 ²⁰	1.62×10 ²⁰	1.31×10 ²⁰	1.56×10 ²⁰	1.31×10 ²⁰	7.24×10 ¹⁹	5.02×10 ¹⁹
磷肥(t)	6.96×10 ³	3.04×10 ³	4.40×10 ³	6.23×10 ³	4.51×10 ³	2.13×10 ³	2.89×10 ³	3.90×10 ¹⁵	2.71×10 ¹⁹	1.19×10 ¹⁹	1.72×10 ¹⁹	2.43×10 ¹⁹	1.76×10 ¹⁹	8.31×10 ¹⁸	1.13×10 ¹⁹
钾肥(t)	8.84×10 ²	6.37×10 ²	1.73×10 ³	2.45×10 ³	2.34×10 ³	8.83×10 ²	9.75×10 ²	1.10×10 ¹⁵	9.72×10 ¹⁷	7.01×10 ¹⁷	1.90×10 ¹⁸	2.70×10 ¹⁸	2.57×10 ¹⁸	9.71×10 ¹⁷	1.07×10 ¹⁸
复合肥(t)															
农药(t)	1.27×10 ³	1.09×10 ³	1.77×10 ³	1.94×10 ³	3.00×10 ³	1.73×10 ³	2.50×10 ³	1.60×10 ¹⁵	2.04×10 ¹⁸	1.75×10 ¹⁸	2.83×10 ¹⁸	3.11×10 ¹⁸	4.80×10 ¹⁸	2.76×10 ¹⁸	4.00×10 ¹⁸
柴油(t)	7.42×10 ³	9.24×10 ³	9.20×10 ³	1.14×10 ⁴	1.58×10 ⁴	1.84×10 ⁴	1.85×10 ⁴	2.87×10	2.13×10 ⁴	2.65×10 ⁴	2.64×10 ⁴	3.28×10 ⁴	4.55×10 ⁴	5.29×10 ⁴	5.30×10 ⁴
汽油(t)	7.78×10 ²	9.69×10 ²	9.64×10 ²	1.20×10 ³	1.66×10 ³	1.93×10 ³	1.94×10 ³	3.04×10 ¹⁵	2.37×10 ¹⁸	2.95×10 ¹⁸	2.93×10 ¹⁸	3.64×10 ¹⁸	5.05×10 ¹⁸	5.87×10 ¹⁸	5.89×10 ¹⁸
机油(t)	7.00×10 ¹	8.72×10 ¹	8.68×10 ¹	1.08×10 ²	1.50×10 ²	1.74×10 ²	1.74×10 ²	2.71×10 ¹⁵	1.90×10 ¹⁷	2.36×10 ¹⁷	2.35×10 ¹⁷	2.92×10 ¹⁷	4.05×10 ¹⁷	4.71×10 ¹⁷	4.72×10 ¹⁷
农机具(kg)	2.39×10 ⁵	2.98×10 ⁵	2.96×10 ⁵	4.81×10 ⁵	6.31×10 ⁵	9.01×10 ⁵	8.53×10 ⁵	6.70×10 ¹²	1.60×10 ¹⁸	1.99×10 ¹⁸	1.98×10 ¹⁸	3.22×10 ¹⁸	4.23×10 ¹⁸	6.04×10 ¹⁸	5.72×10 ¹⁸
石灰(kg)	1.73×10 ⁷	1.73×10 ⁷	1.78×10 ⁷	2.80×10 ⁷	3.25×10 ⁷	4.08×10 ⁷	4.25×10 ⁷	2.98×10 ¹¹	5.16×10 ¹⁸	5.17×10 ¹⁸	5.29×10 ¹⁸	8.34×10 ¹⁸	9.68×10 ¹⁸	1.22×10 ¹⁹	1.27×10 ¹⁹
漂白粉(kg)	9.90×10 ⁵	9.92×10 ⁵	1.02×10 ⁶	1.33×10 ⁶	1.37×10 ⁶	2.04×10 ⁶	2.12×10 ⁶	2.15×10 ¹²	2.13×10 ¹⁸	2.13×10 ¹⁸	2.18×10 ¹⁸	2.87×10 ¹⁸	2.94×10 ¹⁸	4.39×10 ¹⁸	4.57×10 ¹⁸
生铁(t)	2.33×10 ⁴	2.10×10 ⁴	7.17×10 ⁴	7.02×10 ⁴	1.50×10 ⁵	6.99×10 ⁴	4.21×10 ³	1.40×10 ¹⁵	3.26×10 ¹⁹	2.94×10 ¹⁹	1.00×10 ²⁰	9.82×10 ¹⁹	2.10×10 ²⁰	9.78×10 ¹⁹	5.89×10 ¹⁸
钢材(t)	1.40×10 ⁵	1.26×10 ⁵	4.30×10 ⁵	4.21×10 ⁵	9.02×10 ⁵	5.12×10 ⁵	2.53×10 ⁴	1.78×10 ¹⁵	2.49×10 ²⁰	2.25×10 ²⁰	7.66×10 ²⁰	7.50×10 ²⁰	1.60×10 ²¹	9.12×10 ²⁰	4.50×10 ¹⁹
铜材(t)	2.12×10 ⁴	1.91×10 ⁴	6.52×10 ⁴	6.39×10 ⁴	1.37×10 ⁵	2.81×10 ⁴	3.83×10 ³	6.80×10 ¹⁶	1.44×10 ²¹	1.30×10 ²¹	4.44×10 ²¹	4.35×10 ²¹	9.30×10 ²¹	1.91×10 ²¹	2.61×10 ²⁰
铝材(t)	2.17×10 ⁴	1.96×10 ⁴	6.68×10 ⁴	6.55×10 ⁴	1.40×10 ⁵	7.68×10 ⁴	3.93×10 ³	1.60×10 ¹⁶	3.48×10 ²⁰	3.14×10 ²⁰	1.07×10 ²¹	1.05×10 ²¹	2.24×10 ²¹	1.23×10 ²¹	6.28×10 ¹⁹
水泥(t)	9.96×10 ²	1.02×10 ³	3.08×10 ⁴	5.41×10 ⁴	1.42×10 ⁵	2.79×10 ⁵	1.50×10 ⁶	3.30×10 ¹⁶	3.29×10 ¹⁹	3.36×10 ¹⁹	1.02×10 ²¹	1.78×10 ²¹	4.67×10 ²¹	9.21×10 ²¹	4.95×10 ²²

续表

木材(t)	1.01×10 ⁴	8.78×10 ³	5.40×10 ⁴	3.50×10 ⁵	1.63×10 ⁵	3.36×10 ⁵	5.29×10 ⁴	6.91×10 ¹⁴	6.99×10 ¹⁸	6.06×10 ¹⁸	3.73×10 ¹⁹	2.42×10 ²⁰	1.13×10 ²⁰	2.32×10 ²⁰	3.65×10 ¹⁹
煤炭(t)	8.88×10 ⁴	6.18×10 ⁴	1.27×10 ⁵	5.60×10 ⁵	4.87×10 ⁵	6.82×10 ⁵	1.94×10 ⁴	1.00×10 ¹⁵	8.88×10 ¹⁹	6.18×10 ¹⁹	1.27×10 ²⁰	5.60×10 ²⁰	4.87×10 ²⁰	6.82×10 ²⁰	1.94×10 ¹⁹
汽油(t)	1.73×10	1.68×10 ³	5.73×10 ³	5.61×10 ³	1.20×10 ⁴	2.58×10 ⁴	5.89×10 ⁴	3.04×10 ¹⁵	5.28×10 ¹⁵	5.12×10 ¹⁸	1.74×10 ¹⁹	1.71×10 ¹⁹	3.65×10 ¹⁹	7.84×10 ¹⁹	1.79×10 ²⁰
柴油(t)	4.30×10 ³	9.34×10 ³	3.18×10 ⁴	3.12×10 ⁴	6.67×10 ⁴	1.21×10 ⁵	1.90×10 ⁵	2.87×10 ¹⁵	1.23×10 ¹⁹	2.68×10 ¹⁹	9.14×10 ¹⁹	8.95×10 ¹⁹	1.92×10 ²⁰	3.46×10 ²⁰	5.47×10 ²⁰
燃料油(t)	1.93×10 ¹	1.87×10 ⁴	6.37×10 ⁴	7.44×10 ⁴	1.04×10 ⁵	2.86×10 ⁵	5.66×10 ⁵	2.77×10 ¹⁵	5.33×10 ¹⁶	5.17×10 ¹⁹	1.76×10 ²⁰	2.06×10 ²⁰	2.88×10 ²⁰	7.92×10 ²⁰	1.57×10 ²¹
塑料(t)	5.50×10 ³	8.31×10 ³	2.52×10 ⁴	5.36×10 ⁴	8.10×10 ⁴	1.69×10 ⁵	1.25×10 ⁵	3.80×10 ¹⁴	2.09×10 ¹⁸	3.16×10 ¹⁸	9.57×10 ¹⁸	2.04×10 ¹⁹	3.08×10 ¹⁹	6.41×10 ¹⁹	4.76×10 ¹⁹
工业设备折旧(¥)	2.13×10 ⁷	2.44×10 ⁷	8.42×10 ⁷	2.38×10 ⁸	4.10×10 ⁸	9.05×10 ⁸	1.83×10 ⁹	能值货币比	2.30×10 ²⁰	2.16×10 ²⁰	4.24×10 ²⁰	6.49×10 ²⁰	8.20×10 ²⁰	8.00×10 ²⁰	1.10×10 ²¹
货运耗柴油(L)	3.06×10 ⁶	3.75×10 ⁶	4.10×10 ⁶	6.50×10 ⁶	5.66×10 ⁷	1.24×10 ⁸	1.52×10 ⁸	2.38×10 ¹²	7.30×10 ¹⁸	8.94×10 ¹⁸	9.77×10 ¹⁸	1.55×10 ¹⁹	1.35×10 ²⁰	2.96×10 ²⁰	3.63×10 ²⁰
折旧与路桥费(¥)	6.68×10 ⁶	8.18×10 ⁶	8.94×10 ⁶	1.42×10 ⁷	1.23×10 ⁸	2.71×10 ⁸	3.33×10 ⁸	能值货币比	7.20×10 ¹⁹	7.25×10 ¹⁹	4.51×10 ¹⁹	3.88×10 ¹⁹	2.47×10 ²⁰	2.40×10 ²⁰	1.99×10 ²⁰
客运耗汽油(L)	2.29×10 ⁷	3.92×10 ⁷	7.55×10 ⁷	9.73×10 ⁷	4.49×10 ⁸	9.79×10 ⁸	4.88×10 ⁸	2.22×10 ¹²	5.10×10 ¹⁹	8.71×10 ¹⁹	1.68×10 ²⁰	2.16×10 ²⁰	2.16×10 ²⁰	2.17×10 ²¹	1.08×10 ²¹
折旧与路桥费(¥)	4.17×10 ⁵	1.43×10 ⁶	1.37×10 ⁶	3.54×10 ⁶	1.63×10 ⁷	3.56×10 ⁷	1.77×10 ⁷	能值货币比	8.98×10 ¹⁸	1.26×10 ¹⁹	6.92×10 ¹⁸	9.67×10 ¹⁸	3.27×10 ¹⁹	3.15×10 ¹⁹	1.06×10 ¹⁹
电(J)	2.49×10 ¹⁴	3.31×10 ¹⁴	8.02×10 ¹⁴	2.22×10 ¹⁵	3.59×10 ¹⁵	6.47×10 ¹⁵	1.10×10 ¹⁶	1.20×10 ⁵	2.99×10 ¹⁹	3.97×10 ¹⁹	9.62×10 ¹⁹	2.67×10 ²⁰	4.30×10 ²⁰	7.76×10 ²⁰	1.32×10 ²¹
第三产业折旧(¥)	1.56×10 ⁷	1.59×10 ⁷	4.82×10 ⁸	3.14×10 ⁸	2.97×10 ⁹	3.45×10 ⁹	6.41×10 ⁹	能值货币比	1.68×10 ²⁰	1.41×10 ²⁰	2.43×10 ²¹	8.57×10 ²⁰	5.94×10 ²¹	3.05×10 ²¹	3.83×10 ²¹
劳务工资(¥)	4.81×10 ⁷	7.11×10 ⁷	1.58×10 ⁸	4.60×10 ⁸	7.14×10 ⁸	1.06×10 ⁹	1.58×10 ⁹	能值货币比	5.18×10 ²⁰	6.30×10 ²⁰	7.96×10 ²⁰	1.26×10 ²¹	1.43×10 ²¹	9.40×10 ²⁰	9.46×10 ²⁰
林业建设投资(¥)	3.83×10 ⁵	1.80×10 ⁵	4.50×10 ⁵	6.40×10 ⁵	8.80×10 ⁵	3.60×10 ⁵	4.50×10 ⁵	能值货币比	4.13×10 ¹⁸	1.60×10 ¹⁸	2.27×10 ¹⁸	1.75×10 ¹⁸	1.76×10 ¹⁸	3.18×10 ¹⁷	2.69×10 ¹⁷
绿化建设投资(¥)	2.56×10 ⁵	1.80×10 ⁵	5.96×10 ⁵	1.76×10 ⁶	1.26×10 ⁷	5.88×10 ⁷	5.13×10 ⁷	能值货币比	2.04×10 ¹⁸	1.18×10 ¹⁸	2.22×10 ¹⁸	4.01×10 ¹⁸	2.09×10 ¹⁹	3.85×10 ¹⁹	2.27×10 ¹⁹
环保投入(¥)	0.00×10	0.00×10	0.00×10	6.76×10 ⁵	3.75×10 ⁶	5.18×10 ⁶	7.84×10 ⁶	能值货币比	0.00×10	0.00×10	0.00×10	1.85×10 ¹⁸	7.51×10 ¹⁸	4.58×10 ¹⁸	4.68×10 ¹⁸
F 小计									3.54×10 ²¹	3.46×10 ²¹	1.20×10 ²²	1.27×10 ²²	2.87×10 ²²	2.40×10 ²²	6.13×10 ²²
总能值用量 U									4.00×10 ²¹	4.16×10 ²¹	1.29×10 ²²	1.59×10 ²²	3.17×10 ²²	2.78×10 ²²	6.66×10 ²²
产出															
国内生产总值(¥)	4.75×10 ⁸	5.29×10 ⁸	1.50×10 ⁹	4.42×10 ⁹	7.38×10 ⁹	1.65×10 ¹⁰	3.33×10 ¹⁰	能值货币比	5.12×10 ²¹	4.69×10 ²¹	7.57×10 ²¹	1.21×10 ²²	1.48×10 ²²	1.46×10 ²²	1.99×10 ²²
能值/货币比率 (sej/\$)	1.83×10 ¹³	1.60×10 ¹³	1.48×10 ¹³	1.31×10 ¹³	1.10×10 ¹³	7.38×10 ¹²	4.94×10 ¹²								
美元/人民币	1.70×10	1.80×10	2.94×10	4.78×10	5.51×10	8.35×10	8.27×10								
sej/¥	1.08×10 ¹³	8.87×10 ¹²	5.04×10 ¹²	2.73×10 ¹²	2.00×10 ¹²	8.84×10 ¹¹	5.97×10 ¹¹								
服务价值小计 \$	1.84×10 ⁸	1.84×10 ⁸	1.86×10 ⁸	1.94×10 ⁸	1.98×10 ⁸	2.09×10 ⁸	2.13×10 ⁸	能值货币比	3.36×10 ²¹	2.94×10 ²¹	2.75×10 ²¹	2.53×10 ²¹	2.18×10 ²¹	1.59×10 ²¹	1.09×10 ²¹
生态经济价值小计									8.48×10 ²¹	7.63×10 ²¹	1.03×10 ²²	1.46×10 ²²	1.69×10 ²²	1.62×10 ²²	2.10×10 ²²
废水(T)	2.59×10 ⁵	2.00×10 ⁵	2.79×10 ⁵	3.09×10 ⁷	2.34×10 ⁷	1.36×10 ⁷	3.51×10 ⁶								
固体废弃物(T)	2.84×10 ⁴	2.66×10 ⁴	8.75×10 ⁴	1.48×10 ⁵	1.20×10 ⁵	1.01×10 ⁵	7.80×10 ⁴								
废弃小计									2.17×10 ²⁰	2.03×10 ²⁰	6.66×10 ²⁰	1.25×10 ²¹	1.02×10 ²¹	8.22×10 ²⁰	6.08×10 ²⁰

* Odum 1996, Huang 1996, Sui 1999, Shen 2001