

# 基于耗散结构理论的生态产业链网结构运行机制研究

## Research on the Operating Mechanism of the Eco-industrial Chain Network Structure Based on Theory of Dissipative Structure

一级学科：管理科学与工程

学科专业：管理科学与工程

作者姓名：李继宏

指导教师：赵涛教授

天津大学管理学院

2010年11月

## 独创性声明

本人声明所提交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：

签字日期：

年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期： 年 月 日

签字日期： 年 月 日

# 中文摘要

随着世界各国的工业越来越高速地发展,所带来的生态环境问题受到越来越多关注。在这样的大背景下,生态工业园区被认为是实现循环经济和保护环境的有效途径,其理论体系中一个核心部分就是生态产业链网结构。相对来说,我国在这个领域的研究基础还比较薄弱,实践上也处于积极探索阶段。因此,进行生态产业链网结构运作机制的理论和实践的研究,对促进生态产业链网结构理论在我国的发展完善与实践具有非常重要的现实意义。

本论文融合众多学者的研究成果,在剖析生态产业链网结构的耗散结构特征的基础上,针对生态产业链网结构在构建和发展延伸过程中补链企业的选择和评价问题、节点企业之间由于协同产生的收益分配问题、生态产业链网结构有序的影响因素和有序测算问题进行数学建模、理论分析及实证验证,力求探索生态产业链网结构运作的影响机制和规律。本文主要创新点如下:

## 1. 生态产业链网结构中补链企业的选择和评价分析

首先从生态产业链网延伸和发展的角度提出了补链企业的概念,对卡伦堡和贵港(制糖)国内外两个成功的生态工业园进行了探讨,从实践的角度分析了生态产业链网结构的发展过程引入补链企业情况,以及补链企业对于生态产业链网结构的稳定发展具有重要意义。在此基础上,提出生态产业多样性是引入补链企业的主要依据,同时对生态产业链网的补链企业选取原则进行了定性分析。在研究国内外相关成果的基础上,建立了补链企业的评价指标体系,提出了将主观和客观赋权方法相结合的权重确定方法。由于可拓学中的优度评价法具有描述非满足不可的条件、用关联函数的正负值反映一个对象的利弊程度等优点,将其引入到生态产业链网结构的评价研究领域,构建了选取补链企业的评价方法。

## 2. 生态产业链网结构协同收益分配模型构建

从生态产业链网结构的节点企业的立体网络形式探讨了生态产业链网结构内部协同关系,得出节点企业之间的生态协同生产会提高整个链网结构的效率。这些副产品交换等的协同关系使链网结构的整体能力超过各个节点企业的综合,即创造出新增收益。创造性地从协同的角度将协同收益概念引入到生态产业链网结构的研究领域,并探讨了协同收益的主要来源。通过节点企业的进化博弈定量分析了协同收益分配是否公平合理决定了链网演化的稳定和方向。针对现有利益分配方法的局限,建立了包括生态技术水平、生态贡献、投入水平和承担的风险四个主要影响因素的协同收益分配因子,并以蒙西工业园区中的二氧化碳生态产业链为例,探讨了该分配因子的实际应用。

### 3. 生态产业链网结构有序的影响因素控制及其测算

本文将有序的概念引入到生态产业链网结构的研究领域，分析了影响生态产业链网结构有序运行的影响因素。采用投入产出方法从定量的角度探讨了生态产业链网结构在受到市场需求波动的影响下，能够调整内部的生产适应环境的变化。生态产业链网结构受到内在和外在因素影响时会表现出两个趋势：有序运动和无序运动。针对这种情况，提出了生态产业链网结构有序的测算方法，从结构和功能两个方面构建了结构熵和功能熵，定量测算生态产业链网结构的有序程度，并进行了实证研究。

**关键词：**补链企业 优度评价法 协同收益 分配因子 有序 结构熵 功能熵

# ABSTRACT

Problems of ecological environment are paid by more and more attention. The eco-industrial parks are considered to be an effective way to protect the environment. A core part of this theoretical system is the eco-industrial chain network structure. Contrastingly, foundation of chinese research in this area is still relatively weak. Therefore, it has very important significance, for the development of this field in China, that the theory and practice of the operating mechanism of eco-industrial chain network is researched.

This paper had integrated many scholars' research. On the basis of analysis of the dissipative structure' characteristic of eco-industrial chain network structure, three issues had researched by mathematical modeling, theoretical analysis and empirical validation. The first one is to select and evaluate chain enterprises in the process of its building and extension. The second one is to allocate synergistic profit among the node enterprises. The last one is to control influence factors and to measure its order. It is hoped to explore the mechanisms and rules of the operation of the eco-industrial chain network structure. Main innovation of this paper is as follows:

1. selection and evaluation of chain enterprises in the eco-industrial chain network structure

First, the concept of chain enterprises had put forward. it had had significance to introduce chain enterprises by analysis of both Kalundborg and Guigang eco-industrial parks. On this basis, it had proposed that eco-industries' diversity is the theoretical basis for introducing chain enterprises. Then the selection principle of chain enterprises had been discussed by qualitative analysis. Based on the study of domestic and foreign achievements, chain enterprises' evaluation index system had established, and the method to combine subjective weight with objective one had put forward. Because the priority degree evaluation method of extenics has many advantages, which can quantificationally describe the degree of things with a certain nature by using relating function' value and etc, evaluation method of selection of chain enterprises had established according as priority degree evaluation method.

2. model of synergistic profit allocation of eco-industrial chain network structure

Synergy of the eco-industrial chain network structure had discussed in the form of three-dimensional network. This synergy has maken the overall capabilities of

eco-industrial chain network structure exceed the integration of node enterprises. Namely, it creates new profit. The concept of synergistic profit had firstly put forward, and its major sources had analysed. Through quantitative analysis of the evolutionary game of node enterprises, the rationality of synergistic profit allocation is to decide the direction of evolvement of the eco-industrial chain network structure. Allowing for the limitations of existing profit allocation method, synergistic profit allocation factor had set up including eco-technology, eco-contribution, investment and borne risk. Takeing the carbon dioxide of Mengxi industrial park as an example, this allocation factor had practically applicated.

### 3. controlling influence factors and measuring order of eco-industrial Chain network structure

This paper had introduceed the concept of order to eco-industrial chain network structure, and analysed factors influencing its order operation. Then by using input-output method, it had been analysed that eco-industrial chain network structure can adjust its production to adapt itself to circumstance's change when it had been influenced by market demand's change. Eco-industrial chain network structure influenced internal and external factors will show two trends of its evolution: order movement and disorder one. So measurement of its orderly degree had proposed, and Affiliation entropy and function entropy had been constructed which can quantificationally measure the degree of its order.

**Keywords:** chain enterprise; priority degree evaluation; synergistic profit; allocation factor; order; affiliation entropy; function entropy

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究背景与研究意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 生态产业链网结构的相关研究综述.....	3
1.2.1 生态产业链网结构的相关研究.....	3
1.2.2 生态产业链网结构中补链企业选择的相关研究.....	4
1.2.3 收益分配的相关研究.....	6
1.2.4 生态产业链网结构有序的相关研究.....	9
1.2.5 目前研究的不足.....	12
1.3 研究内容、方法及技术路线.....	13
1.3.1 研究内容与方法.....	13
1.3.2 技术路径.....	14
1.4 论文创新点.....	16
<b>第二章 耗散结构理论概述</b> .....	<b>17</b>
2.1 耗散结构理论中的基本内容.....	17
2.1.1 耗散结构理论的产生与发展.....	17
2.1.2 耗散结构的概念.....	19
2.1.3 耗散结构的特征.....	20
2.1.3 耗散结构理论概要.....	21
2.2 耗散结构理论的相关应用.....	27
2.2.1 耗散结构的普遍性.....	27
2.2.2 耗散结构理论在人文社会科学领域中的应用.....	27
2.3 生态产业链网结构的耗散结构特征.....	29
2.3.1 生态产业链网结构是一个包含众多节点企业的开放系统.....	29
2.3.2 生态产业链网结构是一个远离平衡态的系统.....	29
2.3.3 生态产业链网结构内存在协同作用机制.....	31
2.3.4 生态产业链网结构内存在涨落.....	32
<b>第三章 生态产业链网结构中补链企业的选择与评价研究</b> .....	<b>35</b>
3.1 生态产业链网结构中补链企业的内涵.....	35

3.1.1 生态产业链网结构中补链企业的概念.....	35
3.1.2 生态产业链网结构中引入补链企业的实例分析.....	36
3.2 生态产业链网结构中补链企业选择的主要因素.....	42
3.2.1 补链企业与核心企业的关系.....	42
3.2.2 生态产业多样性是引入补链企业的主要依据.....	42
3.2.3 评价指标体系的构建.....	43
3.3 生态产业链网结构中选择补链企业评价模型的构建.....	45
3.3.1 可拓学与优度评价法.....	45
3.3.2 评价方法的建立.....	46
3.3.3 应用算例.....	51
3.3.4 结果分析.....	58
3.4 本章小结.....	58
<b>第四章 生态产业链网结构的协同收益分配模型研究.....</b>	<b>59</b>
4.1 协同收益概念的提出.....	59
4.1.1 生态产业链网结构中节点企业的协同关系.....	59
4.1.2 协同收益的定义.....	60
4.1.3 协同收益的来源.....	61
4.2 协同收益分配对节点企业协同关系的影响分析.....	66
4.2.1 协同收益分配的定义.....	66
4.2.2 考虑协同收益分配的节点企业进化博弈.....	66
4.2.3 协同收益分配的原则.....	69
4.3 生态产业链网结构的协同收益分配模型.....	71
4.3.1 现有收益分配方法评价.....	71
4.3.2 协同收益分配模型的构建.....	72
4.3.3 应用算例.....	78
4.3.4 结果分析.....	81
4.4 本章小结.....	82
<b>第五章 生态产业链网结构有序的影响因素及其测算研究.....</b>	<b>83</b>
5.1 生态产业链网结构有序问题的提出.....	83
5.1.1 生态产业链网结构涨落的两种趋势.....	83
5.1.2 生态产业链网结构有序的概念.....	85
5.2 生态产业链网结构有序的影响因素和控制分析.....	86
5.2.1 生态产业链网结构有序的影响因素.....	86

5.2.2 市场需求变动下的反馈控制模型.....	89
5.2.3 应用算例.....	93
5.2.3 结果分析.....	95
5.3 生态产业链网结构有序的测算模型.....	96
5.3.1 结构熵的测算.....	96
5.3.2 功能熵的测算.....	98
5.3.3 生态产业链网结构的熵与耗散结构的序的关系.....	100
5.4 应用算例.....	101
5.4.1 结构熵的测算.....	101
5.4.2 功能熵的测算.....	103
5.5 本章小结.....	104
<b>第六章 结论与展望.....</b>	<b>106</b>
6.1 全文结论.....	106
6.2 研究展望.....	107
<b>参考文献.....</b>	<b>109</b>
<b>发表论文和科研情况说明.....</b>	<b>118</b>
<b>附 录.....</b>	<b>119</b>
<b>致 谢.....</b>	<b>130</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景与研究意义

#### 1.1.1 研究背景

在最近的 100 年，人类在发展经济的同时，人类活动对地球生物圈的影响越来越大，使自然环境遭到了极大的破坏。尤其是自 18 世纪近代工业发展以来，工业生产过程中总是伴随着大量废物或副产品的产生，生态环境的日益恶化并由此引发了众多问题，如空气污染、水质污染、臭氧层破坏、土壤沙漠化等，工业污染占相当大的比例，使得人类面临可持续发展的危机。刚刚过去的这个世纪是历史上人类社会经济发展最辉煌、也是生态环境被破坏最严重的一个时期。联合国规划署 2002 年在巴黎发布的《全球经济综合报告》<sup>[2]</sup>中以循环经济为重点，指出：“过去十年，传统的线性经济方式进一步导致环境退化和灾难加剧，对世界造成了大约 6 千亿美元的损失—相当于此前 40 年中的损失总和。”“最新气候模型表明，除非大大减缓资源使用，推行循环经济模式，否则到 100 年以后的 2100 年，地球温度比现在上升 6 摄氏度，必然导致气候变暖、生物多样性减少、土壤贫瘠、空气污染、水极度缺乏、食品生产减少和致命疾病扩散等全球性重大环境问题”。人类在利用不断进步的科技文明创造辉煌的物质文明同时，由于对自然资源的开发和索取大大超过了自然资源的负荷能力和生态系统的承载力，因而也为自己无节制地向大自然攫取资源财富的行为付出了昂贵的代价并饱尝其苦果。

随着世界各国的工业越来越高速地发展，所带来的生态环境问题受到越来越多关注。如在 1992 年 6 月，在巴西里约热内卢举行的联合国环境与发展大会上，世界各国通过了《里约环境与发展宣言》和《21 世纪议程》两个纲领性文件以及《关于森林问题的原则声明》，签署了《气候变化框架公约》和《生物多样性公约》。在这些宣言和公约中，可持续发展的新思想、关于环境与发展领域合作的全球共识和国家之间的政治承诺得到了充分体现，对人口、资源、环境协调发展起到了积极的推进作用。

迄今为止，当今世界最先进的经济发展趋势就是循环经济，其中，生态工业园区是实现循环经济和保护环境实现可持续发展的有效途径。生态工业园区的核心思想就是要实现不同企业之间形成资源共享、副产品交换和废弃物有效处理的产业共生，使副产品变“废”为“宝”，实现区域的“废物零排放”，将整个工

业系统作为一个“闭路环绕”的共生生态的网络。

### 1.1.2 研究意义

我国目前正处于经济高速发展的时期，一方面面临着提高社会生产力、综合国力和人民生活水平的历史任务，另一方面在经济发展过程中又存在着人口众多、资源相对匮乏和工业化和城镇化造成的环境污染等严峻问题，因此经济社会发展与资源匮乏、环境污染之间的矛盾较为突出。但长期以来，由于我国企业的总体技术水平不高，大多采用以大量消耗资源粗放型的“资源—产品—排放废物”式生产模式，这种线性生产模式造成的排放的废弃物严重污染环境和资源使用的低效率现象十分严重。据统计，目前我国万元生产总值的能耗大约是美国的3倍、日本的6倍、韩国的4.5倍；钢耗是美国的5.8倍、日本的2.7倍；全国每天约有1亿吨污水直接排入水体，全国七大水系中一半以上河段水质受到污染，经济建设对生态环境的破坏所造成的经济损失近3000亿元<sup>[3]</sup>。资料还显示工业污染物占污染物排放总量的70%<sup>[4]</sup>。这种随着经济发展所带来的严重后果，极大地阻碍了我国经济的可持续发展和人们生活质量的不断提高。

为此，近几年我国政府和相关研究机构把积极发展循环经济作为实现经济社会与资源环境协调发展的重要举措。近年来，提出的构建“和谐社会”的重要内容之一：把经济社会发展与资源环境协调起来，就是最好的例证。

作为循环经济发展的一个重要实践形式：生态工业园，正在成为我国按照科学发展观，走上科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的新型工业化道路的重要途径。美国Indigo发展研究所<sup>[5]</sup>于1992年底，根据循环经济理念提出了一种新型的工业组织形式，这就是生态工业园的概念，其目标是尽量减少废物，将园区内一个企业产生的副产品用作另一个企业的投入或原材料，通过废物交换、循环利用、清洁生产等手段，最终实现园区污染物的“零排放”。生态工业园与一般的工业园的最大区别在于，园区内的各种产业不会受到生态方式和行政边界的限制，同时在原材料的供应、产品的分配和信息技术等方面享有同等的权利和平台，从而可以获得共同发展<sup>[6]</sup>。由于不仅具有原材料和初级产品生产、加工工业和服务业等多产业密切联系、合理组织、系统良性循环等特点，而且是传统生产方式向现代产业发展过程中的必然选择，生态工业园区建设受到了世界各国的高度重视，这种模式也将会成为我国可持续发展的代表性模式之一，国内外的众多成功的实践经验也证明了生态工业园区较好地满足现代社会对发展生产的现实要求。

生态工业园的理论体系中一个核心部分就是生态产业链网，从工业生态学理论的角度来说，生态产业链网以恢复和扩大自然资源的存量为宗旨，为提高资源

基本生产率和根据社会需要为主体，通过产品体系规划、元素集成以及数学优化方法，构建材料、产品、副产物及废物的生态产业链，实现物质的最优循环和利用<sup>[8]</sup>。因此，目前关于生态产业链网的相关问题也成为研究热点之一。

然而，在发展循环经济这样的大环境下，我国的生态产业链网的研究是在学习和借鉴国际先进理论和实践的基础上开展起来的，但是在国外既有成功的实践经验，又有失败案例的大背景下，在国内生态产业链网的建设和发展的实践过程中，同样也遇到了类似或特殊的问题和困难。相对来说，我国在这个领域的研究基础还比较薄弱，实践上也处于积极探索阶段。目前我国的生态产业链网普遍存在过分依靠政策手段和行政命令来达到建设的目标。因此，适时建立符合我国国情的生态产业链网的理论体系，进行生态产业链网运作机制的理论和实践的研究，对促进生态产业链网理论在我国的发展完善与实践具有非常重要的现实意义。

## 1.2 生态产业链网结构的相关研究综述

### 1.2.1 生态产业链网结构的相关研究

#### 1. 生态产业链的内涵研究

学术界曾使用过不同的称谓，用来研究生态产业链网结构问题。如刘力和郑京淑<sup>[8]</sup>在 2001 年提出了产业生态链，刘志峰、林巨广等<sup>[9]</sup>在 2002 年提出了工业生态链，王灵梅、张金屯<sup>[10]</sup>在 2003 年提出了生态产业链，陈杰、屠梅曾等<sup>[11]</sup>在 2004 年提出过生态供应链，边均兴<sup>[12]</sup>在 2005 年提出了生态工业链等。其中，以生态产业链使用最多，本文将沿袭这一概念。目前对生态产业链这一概念的界定是众说纷纭，其中比较有代表性的有以下几种。

王兆华<sup>[14]</sup>在 2003 年率先提出了生态产业链概念，从整体生态循环的角度对生态产业链进行了界定，它是指某一区域范围内的企业模仿自然生态系统中的生产者、消费者和分解者，遵循自然生态规律，以资源（原料、副产品、信息、资金、人才）为纽带形成的具有产业衔接关系的企业联盟，实现资源在区域范围内的循环流动。

徐大伟等<sup>[15]</sup>学者在 2005 年从生态学理论的角度对生态产业链概念的含义进行了探讨：生态产业链是以恢复和扩大自然资源存量为宗旨，为提高资源基本生产率和根据社会需要为主体，对两种以上产业的链接所进行的设计或改造，开创了一种新型的产业系统的系统创新活动。也就是工业生态系统中甲企业的废物是乙企业的原料，乙企业的废物又成为丙企业的原料…，以此类推，把不同企业产

生的废物利用到不同阶段的生产过程中,使污染在生产过程中被清除,这个过程就是生态产业链,各个产业链共同组成工业生态系统,以实现工业生态系统的代谢功能。

张艳<sup>[13]</sup>在 2006 年从工业共生的角度提出了生态产业链概念的定义,是指在工业生产的新陈代谢过程中,通过工业生产的排泄物—生产剩余物将不同产业连接在一起的一种链状资源利用关系。同时指出,对于工业生产中的剩余物进行再利用,以此提高该类物质的经济价值,由此构成的各种对剩余物质的加工途径成为真正意义上的工业食物链。

## 2. 工业生态网络稳定性的内涵研究

对工业共生网络的研究出现的时间较短,仍处于摸索阶段,因此对工业共生网络的稳定性的相关研究非常有限。由于研究的角度和研究的方法不同,目前存在很多不同但又相关的概念。归纳起来,大致有以下几种<sup>[16]</sup>:抵抗性、恢复性、持续性、变异性 and 一致性、轨迹稳定性、兼容性和集合稳定性。其他一些概念,如局域稳定性、全局稳定性、弹性等都可归结到以上定义的范畴之内。总的来说,主要有以下几种定义。

肖忠东<sup>[17]</sup>对工业生态网络稳定性的界定:工业生态系统稳定性指一个工业生态系统内外部环境出现不同程度的变动时,系统维持稳定状态的能力。

武春友等<sup>[18]</sup>将工业生态系统的稳定性定义为:处于平衡状态中的工业生态系统在干扰出现的情况下,保持自身当前状态的能力。

朱睿<sup>[19]</sup>将生态工业园中工业共生网络稳定性的定义为,生态工业园工业共生网络的稳定性是当内、外部环境出现不同程度的变动时,网络组织成员能保持有效工业共生关系的能力。有效的工业共生关系是指各组织成员能持续地实现经济效益和环境效益“双底”的工业共生合作关系。

借用生态稳定性的概念,对于工业生态网络的稳定性可以从两个方面予以界定:工业生态网络的抵抗能力、工业生态网络的修复能力。前者是指变动发生后,系统的承受能力,其大小取决于系统组成要素即产业种群的一致性(这种一致性部分取决于要素之间较强的互补性)和生态多样性;后者是指在遭受外部干扰出现不同程度的损伤后,针对这种损伤,系统自行修复的能力,其修复能力的高低取决于系统自身的协调性,系统组成要素相互之间的替代性越高,则系统的修复性越强。修复能力在某种程度上显示了工业生态系统的柔性。

### 1.2.2 生态产业链网结构中补链企业选择的相关研究

王秀丽<sup>[20]</sup>针对生态产业链中的合作伙伴,提出了采用 FAHP(模糊层次分析

法)和证据理论相结合的方法选择合作伙伴。采用了FAHP方法首先确定评价指标的权重,并初步评估备选伙伴,最后采用证据理论的方法得出综合的支持度作为最终的排序标准。

针对丹麦、美国、加拿大、斐济、日本和中国等国家已形成的典型生态工业园区,有众多的文献从生态工业园区发展的政策、实施方式、背景及特色、类型、产业链的形成路径等方面进行了研究。

Lowe和Warren等<sup>[21]</sup>认为,生态工业园的最重要特点之一是内部之间的合作以及与自然环境的互动。由于利益的驱动,园区中的企业自愿甚至是自发的进行这种合作和互动,通过废物的交换、信息的交流、管理的配合以保证生态工业园的效率,同时使每个独立的个体如企业、社区和政府等获利。生态工业园通过有限资源需求的减少和较少的固体废物及污染的压力等措施,实现了其最重要的目标:提高环境质量。

生态工业园的废物流动从市场机制的角度来说,本质上是一种供需关系。Ayres<sup>[22]</sup>认为生态工业园包含至少一个输出原材料或加工物资的主要企业作为“核心”企业,这类企业向能利用其废物流中有用部分的更多企业供给废物,进行市场交易;这些更多的企业再与几个将废物转变成可用产品的企业相联系。

企业之间的链接关系和副产品或废弃物交换的交易成本是生态产业链网构建的基础,利益驱动是生态产业链网形成的重要前提条件之一。无论何种企业,其经营的最终目的是为了利润最大化,如张秋根、钟书华等<sup>[23,24]</sup>研究的生态工业园中的制药厂、电厂、石膏厂等企业,制药厂选择使用电厂的蒸汽是因为经可行性研究,认为选择电厂的蒸汽供热最为便宜。同样,石膏厂使用电厂的除尘副产品工业石膏也是为了节省资金,也就是说,是经济利益最终将不同企业联系在一起。

生态技术的发展是生态产业链网发展的保障<sup>[12]</sup>。副产品或废弃物成分有回收利用的价值,不能含有毒物质且成分稳定。即如各种制药厂或酒厂发酵物的副产品或残渣,或者农业和林业废弃物,化学成分一般为有机物,可以用作为生产的原料。

搜寻成本、信息成本、谈判成本、讨价还价和决策成本(事先的交易成本)以及履约成本、风险成本(事后的交易成本)等<sup>[12]</sup>是任何类型的企业进行合作时,不论企业的规模、企业类型和产品特点是否不同,都可能发生的一般交易成本,尽管交易成本的大小也不尽相同。从一般意义上说,企业间的合作是建立在相互依赖和信任基础之上的,并且以合同形成契约关系。由于企业的产权明确,而且都谋求最大的经济效益,或减少废物处理费用,企业的副产品都能严格地按合同的要求保证供货质量,减少了交易成本,利于生态工业园的稳健发展。

价值链在降低生态工业园企业的成本、增强企业功能方面将起到很大的作用。价值链管理为现阶段生态工业园所面临的一些问题,提供了一种借鉴和解决方法<sup>[25]</sup>。

生态产业链网的结构是决定园区整个工业生态系统的稳定性和可持续性的关键因素,王兆华等<sup>[14]</sup>在2003年围绕生态产业链网的结构进行了研究,提出其结构模型。这种结构模型是由生态产业链、基础设施和公共服务三个子系统构成的生态工业园,其运作效率取决于生态产业链网中节点企业的绩效和产业链网的结构特征。生态产业链网的构建模式分为两种:新建模式和加环闭合模式。新建模式是指通过将新建的产业集中在一定区域内,利用自然界的食物链的原理将其链接,并统一进行规划、建设和管理而实现生态化。加环闭合模式是指通过对传统产业进行生态化的改造,使不同的产业进行链接,并通过对产业链的延伸和加环实现物质和能量的闭路循环。

### 1.2.3 收益分配的相关研究

#### 1. 工业共生效率的相关研究

1992年,世界环境与发展大会中,世界工商界可持续发展协会<sup>[26]</sup>(WBCSD)在报告书《改变经营之道》,正式提出“生态效益”一词。认为生态效益是“增加更多价值的同时不断地减少资源消耗和污染”。

岳琴<sup>[27]</sup>从微观经济组织的层面,对生态产业链中产生的效益进行了系统的核算,认为产业链产生的利益不仅表现为经济效益,更重要的是生态效益。

席桂萍<sup>[28]</sup>提出共生效率可以分别从经济、社会和生态三个层面来进行分析,并以某企业集团生态工业为例,针对提出的三个层面进行了实证研究。袁增伟<sup>[29]</sup>等从投入和污染物排放量各方面建立了指标体系,以评价工业共生系统的效益,对苏州工业园的共生效益进行了探讨。

王秀丽<sup>[20]</sup>提出了共生能量的概念,是企业共生条件下新增的能量。认为生态产业链中企业在合作过程中产生共生能量是企业实现工业共生的重要本质特征,采用shapley值方法分析了共生能量分配问题。

甘永辉<sup>[30]</sup>将工业共生效率定义为工业共生系统的共生效益与其共生成本的比值,认为可以用来预测、分析和评价生态工业园的经济、环境和社会效益,并探讨了生态效率的运算方法及应用范围。

#### 2. 供应链利益分配研究现状

有众多的文献研究供应链合作利益分配问题,形成了很多相对成熟的解法。

如郝海, 郑丕所<sup>[31]</sup> 分析了供应链中合作伙伴之间的收益共享和风险共担机制, 利用 Shapley 值法分析供应链中合作企业的利益分配问题。并针对应用实例, 提出了培育合作关系的建议。

在 50 年代初纳什<sup>[32]</sup> 首次提出的协商对策成为研究协商问题的成熟方法, 在一直得到广泛的应用和发展。如叶飞采用 Nash 谈判模型<sup>[33]</sup> 分析虚拟企业利益分配问题等。

Cachon 在 1998 年<sup>[34]</sup> 提出供应链中的合作企业都追求个体利益最大化时, 会产生最优整体利益无法实现的情况, 这需要采取恰当的激励方式以避免“双重边际效应”的存在。

Jeuland<sup>[35]</sup>、Whang<sup>[36]</sup>、林勇<sup>[37]</sup> 等总结了四种合作激励方法: 定价法、合同关系、收益分享方法和特许经营模型。主要研究成果有:

Jeuland、Shugan<sup>[35]</sup> 提出了数量折扣方法, 认为该方法克服了以往简单定价方法的局限, 有利于合作企业内部价格的转移。Corbett、De Groote(2000)<sup>[38]</sup> 利用简单库存模型, 研究了不对称信息下的最优数量折扣策略问题。

Faratin P<sup>[39]</sup> 等利用模糊数学的方法, 给出价格效用函数的计算方法, 并讨论了基于 Multi-Agent 的协商双方就价格进行协商的模型和策略。

马士华<sup>[42]</sup> 针对市场产品需求量波动的情况进行了合作模式的研究, 提出了时间-价格合作模型。该模型通过利用时间、成本的限制来界定期权的行使, 并在此基础上建立供应商和制造商的协商机制。

伍云山<sup>[43]</sup> 运用信息经济学的单阶段静态激励模型, 研究了制造商对其零售商实施的最优激励问题。

侯云章<sup>[46]</sup> 研究了单周期产品二次订货策略的协调机制问题, 认为二次订货可以大大提高零售商和整个供应链的收益。

申亮, 王玉燕<sup>[47]</sup> 采用博弈论中的主从 Stackelberg 博弈模型, 研究了不完全信息环境下制造商与回收商逆向供应链的运作问题。

王文宾, 达庆利<sup>[48]</sup> 采用博弈论中的 Stackelberg 博弈, 研究比较了以制造商为主导的 3 种情况, 即制造商不参与渠道、制造商参与渠道以及集中式决策下, 制造商与零售商的利润分配问题。

Tsay 和 Lovejoy(1999)<sup>[49]</sup> 使用指数权重移动平均法, 研究了完全信息与不完全信息两种情况下, 开环反馈控制策略和最低数量承诺合同问题。

顾巧论、陈秋双<sup>[55]</sup> 根据委托代理理论, 分析了不完全信息下制造商在自身收益最大化的基础上建立了一种最优回收合同的激励机制, 该机制使回收商在报出真实运营成本的同时, 最优化自身利润, 并进行了实证研究。

Webster 和 Weng(2000)<sup>[52]</sup> 采用两阶段报童模型的退回策略, 研究了该策略

对制造商的期望利润和最小利润的影响问题。Pasternack<sup>[57]</sup>采用两阶段报童模型，研究了零售商在资金有限的情况下收益共享问题。

Gerchak 和 Wang(2002)<sup>[56]</sup>研究了两种类型下的组装企业和部件供应商之间的关系，VMI 下的组装企业主导的收益分享以及供应商主导的批发价策略。

Portcus 和 Whang<sup>[59]</sup>提出了制造商和营销商之间的两个激励计划，认为该方法可以实现整体价值的最大化。

### 3. 动态联盟利益分配研究现状

企业参与联盟的根本目的是追求利益最大化，每个参与企业都希望能分得更多的利益，因此利益分配是否相对合理成为动态联盟运作中核心问题。关于动态联盟利益分配的问题，许多文献从不同的角度进行分析。

冯蔚东<sup>[64]</sup>、Ossadnik.W.<sup>[65]</sup>等探讨了虚拟企业中收益分配比例确定的基本原则，在遵守多赢规则的基础上，收益分配应体现风险和投资与分配比例的正比关系；利用模糊综合评判法，给出了具体的一种收益分配比例计算方法。

陈一鸣、黄卫、Chang J. J.等<sup>[66, 67]</sup>在协作企业有合作和不合作的两种策略的前提下，对五种典型的协作企业预期收益结构的稳定性进行了探讨，并有针对性的提出了提高其稳定性建议。

李红铃等<sup>[68]</sup>对企业技术联盟效益进行了分类，认为联盟效益的多样性导致了效益分配模式的多样性，分析了理想状态下联盟效益的博弈分配方法。

吴宪华<sup>[69]</sup>根据委托代理理论，针对两人联盟面临着逃避责任倾向的双向道德风险时，研究了其产出分享合同形式下的动态联盟的利益分配问题，并进一步分析了引入团体惩罚机制提高了利益分配的效率。

针对讨价还价博弈和非合作博弈的不足，卢少华等<sup>[70]</sup>讨论了动态联盟的会员的产品需求价格弹性与四个因素相关：产品的价格、产品的产量、原料消耗率和对上游产品价格的承受能力，指出协商博弈是动态联盟价格博弈是利益分配最佳策略。

孙东川，叶飞<sup>[71]</sup>以动态联盟中各个企业不结盟时单独运营所得收益为下界，并以收益分配必须使每个企业都从联盟中得到好处为前提，利用纳什谈判模型研究了动态联盟中的利益分配问题。

陈菊红、汪应洛<sup>[72]</sup>等首先分析了影响收益分配的两个影响因素：外生性和内生性非对称信息，这两类信息决定了收益分配的不对称。因此将动态联盟的收益分配过程看作一个博弈过程，探讨了最合理的收益分配系数以及在已有的收益分配方案下各企业的最优行动选择两个问题。

郑文军<sup>[73]</sup>根据信息经济学中的委托代理理论，建立了敏捷虚拟企业的利润分

配模型，分析了创新性努力、市场风险和收益分配比例之间的关系。

韩建军，郭耀煌<sup>[74]</sup>在道德风险理论的基础上，建立了基于事前协商的动态联盟利润分配的博弈模型，针对不同的事前利润分配合同，给出了分配机制确定的基本原则。并得出以下结论：企业会选择不同的行为方式以实现自身效用最大化，进而影响到整个动态联盟协作的整体效益。

## 1.2.4 生态产业链网结构有序的相关研究

### 1. 有序的相关研究

李晓东<sup>[74]</sup>提出经济微观态、经济序和经济有序化概念，以描述区域经济在有序化过程中某时刻所处的状态和水平，在此基础上定义了以经济序作为测度指标的经济熵，以经济序的变化度量区域经济的有序程度，并定量分析了经济熵可以反映区域经济有序程度的变纯趋势。

胡文新<sup>[76]</sup>通过研究产业结构演进的规律及动因得出结论产业结构演进具有有序性的主要动因是技术创新，并针对我国产业结构的现状及其转换的政策取向进行了实证研究。

李伟刚<sup>[77]</sup>通过对复杂系统结构分析并利用矩阵工具，建立了“要素-结构”的关系矩阵、长度矩阵和负熵矩阵，提出了权重矩阵、修改长度矩阵和复杂系统结构分析的递阶逐层算法。

任建雄<sup>[78]</sup>在耗散结构理论的基础上，分析了开发区的有序演化模型和演化动力，认为其有序演化的关键是通过与外界不断交换物质、能量和信息的非线性动力过程，引入类负熵流，实现开发区向高层次系统的演化和持续发展。

### 2. 生态产业链稳定性的研究现状

目前学术界普遍认为，生态产业链的稳定性体现在对外界干扰的抵抗能力以及自我修复能力，这两种能力是保证生态工业园区发挥作用的基础。目前，有关生态产业链稳定性的问题已经受到关注，主要有以下研究成果。

#### 1) 定性研究

Lowe<sup>[79]</sup>指出，园区中企业之间以相互之间的副产品作为原材料，当一家企业的生产出现问题时会使得整个生态产业链造成下游企业的原材料供应不足的现象。

Côté<sup>[80]</sup>将生态学中的生态位概念引入到生态工业园的研究领域，从企业生态位的角度提出增加生态工业园区中节点企业的多样性，当存在各种噪声时可以提高整个生态工业园的恢复力和稳定性。

Anja-Katrin Fleig<sup>[81]</sup>研究认为生态工业园中进行合作生产的企业之间依赖性造成园区中物质流、能量流和信息流的交互网络的复杂性,这容易造成节点企业之间的生产合作程度越高,彼此生产依赖的程度越大,一旦出现意外情况合作关系破裂的风险越大。

Catherine Hardy和Thomas E. Graedel<sup>[85]</sup>在研究工业生态系统内部结构的基础上,提出内部企业之间关联度的提高和系统稳定性的提高没有明显的相关性。

Sumita Majumdar<sup>[82]</sup>认为制度、技术、经济、信息、组织、法律和认知等七个因素会导致工业生态网络的发展出现不稳定的现象。

Lowin<sup>[62]</sup>在研究马萨诸塞州工业园的基础上,认为资金来源、经济手段、信息管理和发送等都会影响生态工业园的稳定性。

Zilahy<sup>[83]</sup>通过对8个高耗能企业进行的实证研究,提出财政支持、高投入低产出、项目重视程度、人力资源问题、认知能力、市场条件、技术障碍等因素影响群生态化工业生态系统的正常运作。

Rose<sup>[86]</sup>通过对四个案例中生态工程技术与传统工程技术的关系的研究,认为这两种技术之间的融合或衔接的问题如果无法解决,那么将制约生态化技术的发展。

楼园、赵红等<sup>[88]</sup>从生态学的角度,提出了企业生态系统的生物成分和非生物成分两大组成成分。在探讨企业生态系统形成过程和稳定性的基础上,提出企业生态系统的稳定性依赖于生物成分的复杂性与非生物成分多变性之间的平衡。

王兆华<sup>[89]</sup>认为当前工业生态系统存在废弃物的分离技术尚不成熟、可用资源的不灵活、原材料供应量的不稳定和技术的保密性等问题,都会影响到工业生态系统的稳定性。

段宁等<sup>[90]</sup>在对我国47个生态工业系统定量研究的基础上,提出关键种企业的规模大、信息交流障碍少、地域空间距离短、成员企业主营业务多样化等因素有利于提高生态工业系统稳定性。

喻宏伟等<sup>[92]</sup>从博弈论的角度探讨了影响生态工业园稳定性的制度安排,认为核心企业的运转情况、契约的完备性、激励与监督机制等因素会直接生态工业园的稳定性。

孙凤芹<sup>[95]</sup>认为生态工业园的某个环节出现问题,给组织结构带来极大的冲击,存在着极其不稳定的因素,提出在影响稳定性的经济、技术、政策和组织结构等几个不同因素中,最关键的是产业链的组织结构。

兰友根<sup>[96]</sup>将产业组织理论应用到生态工业园区稳定性的研究,提出了稳定性的表现、影响稳定性的主要因素和提高稳定性的政策。

## 2) 定量研究

当前使用量化方法对生态系统稳定性作出研究的文献主要有：

Côté<sup>[80]</sup>率先开创性地将生物学模型，即“传染原理”和Logistic模型，用于对技术扩散等经济问题进行了定量分析。

郭莉<sup>[98]</sup>运用Logistic增长模型来研究企业独立状态下生态效益的增长规律，求解获得平等型、依赖型、依托型、单向获利型四种工业共生模式的稳定性条件。

Paul H等<sup>[99]</sup>在借鉴生态系统的多样性越高稳定性越好理论的基础上，提出可以直接用Shannon和Weaver的量化工具来衡量稳定性。

顾江<sup>[100]</sup>从熵理论的角度研究生态系统稳定性，将生态系统的稳定性分为：线性系统的稳定性和非线性系统的稳定性，认为线性系统最终趋于定态，不会有较高的生产力；而根据李亚普诺夫稳定判据，非线性系统随着负熵流的不同趋于不同的状态。

李敏<sup>[101]</sup>构建了生态产业链链接生态水平的模糊综合评价模型和生态产业链网稳定性的综合评价体系，对生态产业链网的稳定性进行评价。

### 3. 共生进化的相关研究

德国真菌学家 Anton de Bary<sup>[60]</sup>在 1879 年提出“共生”一词，是指不同种属按某种物质联系而生活在一起。Caullery<sup>[61]</sup>和 Lewin<sup>[62]</sup>在这个共生概念的基础上进行了扩展研究，进一步定义了互惠共生、寄生等和其他有关不同物种生物体间关系的概念。哈佛大学的 E. O. Wilson<sup>[63]</sup>通过研究昆虫和鸟类的的生活习性，对群体共生现象进行了归纳，认为自然生物中存在群体寄生、群体偏利共生、群体互惠共生三种现象，并对三种共生进行了详细的分析和总结，使人们对于共生的模式有了更清楚的认识。

在生物学中存在共生效应<sup>[102]</sup>。效应的本意是指物理的化学的作用所产生的效果，后来引申为在社会中某个人的言行或某件事的发展所引起的反应和效果。在生物学领域中，两种或两种以上的不同种类的生物一起生活、互为利用的现象较为普遍，人们就这种把生物间的相依生存和竞向生长的现象称为“共生效应”。共生理论在生物学范畴研究的深化和完善为在其它领域的拓展和应用奠定了良好的基础。

不仅生物界存在共生现象，而且社会系统中同样存在共生现象。袁纯清<sup>[103]</sup>在 1998 年提出：共生不仅是一种生物现象，也是一种社会现象；共生不仅是一种自然状态，也是一种可塑形态；共生不仅是一种生物识别机制，也是一种社会科学方法。

根据生物学中的共生概念，袁纯清<sup>[103]</sup>提出社会科学中的共生要素，包括共生单元、共生模式和共生环境的共生三要素。并在此的基础上，提出了反映共生

体形成与发展中内在必然联系的共生基本原理：质参量兼容原理、质参量兼容原理、质参量兼容原理。

众多学者从工业共生的角度来考察生态工业园中企业之间的关系。

1997年 Erkman<sup>[104]</sup>追溯了关于工业共生的基本思想，提出了对工业共生的最初构想。

Frosch 和 Gallopoulos<sup>[105]</sup>通过研究工业生态系统，提出这类系统具有“能量和物质消耗被优化，一个过程的输出成为另一个过程的原材料”的特征，并形成了工业共生的概念。

Ayres<sup>[106]</sup>提出生物圈和工业经济都是“物质转换的系统”，存在“工业共生关系”，工业代谢能够导致物质流和废物流向更高效率的方向变化。

Reid Lifset<sup>[107]</sup>通过研究工业共生的物质交换和在卡伦堡的实现过程，提出“工业共生并不仅仅是关于共处的企业之间的废物交换，而是一种全面的合作”。

Baas 和 Frank<sup>[108]</sup>通过对工业系统与自然系统的共生的比较研究，得出工业共生的运作与自然生态系统(有规律的再生产和适应性的食物链关系)的并不相同，而是由各自相对独立的共生企业所具有的竞争优势驱动的，相互作用和相互合作的意愿强度取决于各自对这种合作的依赖关系的不对称性，各种活动之间并不是单纯的合作，而是一种合作与竞争的混合体，因此，减少生态影响重点应该集中在产品的设计上而不是废物流上。

Schwarz 和 Steininger<sup>[109]</sup>认为在大部分情况下，通过企业之间相互合作，工业再循环网络中从一个生产过程中产生的废物不能被同样的生产过程再次使用，只能被其他生产过程使用。也就是说，通过相互合作企业的不同生产过程来实现对“上游废物”的再使用。

### 1.2.5 目前研究的不足

生态产业链网结构是现代企业在面对不断变化的市场和日益严峻的环境问题时形成的一种新组织模式，与其他人造系统一样，正在经历从简单到复杂，从不稳定到稳定，从局部最优到全局最优的进化过程。生态产业链网结构的研究已经涉及到各个领域，既包括了基础理论的研究，也包括了对实践经验的总结。总的来说目前国内外关于生态产业链网结构的研究还刚刚起步，从已有相关的理论研究和实践现状来看，生态产业链网结构的研究还存在以下不足。

1. 研究文献多倾向于生态产业链网结构初级发展阶段的研究。主要侧重于某个研究领域，如对于生态产业链网结构的形成、规划和设计等问题研究较完善，实证研究的成果大多集中在生态产业链构建结构合理性等问题的分析。但是从动态角度分析生态产业链网结构在长期发展中出现结构变化时，对于补链企业选择

的理论和方法的文献相对较少。

2. 现有文献对于生态产业链网结构的研究成果比较集中在如何通过资源集成提供资源的利用率、生态工业园工业共生的生成机理等研究领域,并且以实证研究为主。但是研究节点企业在协同生产过程中产生的新增收益的研究文献相对较少,仅有少量的对生态效率评价进行了定量研究的文献也存在局限性。

3. 目前有部分文献针对生态工业园的运营绩效的评价、生态工业园系统的演化仿真等问题进行了定量研究。但是从系统具有一定适应性的角度,研究生态产业链网结构的适应能力的文献较少,并且当生态产业链网结构受到各种消极因素影响而出现变化时,如何定量评价或测算其整体运行状态的文献也相对较少。

## 1.3 研究内容、方法及技术路线

### 1.3.1 研究内容与方法

生态产业链网结构所涉及的研究领域较多,为此,论文首先进行了大量的文献检索与查阅,了解相关领域的理论研究内容和进展状况,使整个研究有坚实的理论 and 实证支持。针对国内外相关研究的薄弱环节,分别在生态产业链网结构变化时的补链企业的选择和评价、节点企业之间的协同收益分配、生态产业链网结构有序问题等方面展开研究。研究内容主要包括以下几个方面:

#### 1. 国内外研究综述及耗散结构理论基础

论文首先对生态产业链网结构的概念、补链企业选择、收益分配和有序测算等研究现状进行了综述;然后,对耗散结构理论的基本内容、相关应用和生态产业链网结构作为耗散结构所具有的特征进行了分析,以上文献综述和理论分析为本文各章节的研究奠定了基础。

#### 2. 生态产业链网结构补链企业的选择和评价分析

首先从生态产业链网延伸和发展的角度提出了补链企业的概念,通过对国内外两个成功案例发展过程引入补链企业情况的探讨,提出生态产业多样性是引入补链企业的主要依据。在分析补链企业和核心企业关系的基础上,对生态产业链网的补链企业选取原则进行了定性分析在研究国内外相关成果的基础上,建立了补链企业的评价指标体系,提出了将主观和客观赋权方法相结合的权重确定方法。由于可拓学中的优度评价法具有描述非满足不可的条件、用关联函数的正负值反映一个对象的利弊程度等优点,将其引入到生态产业链网结构的评价研究领域中,构建了选取补链企业的评价方法。

### 3. 生态产业链网结构协同收益分配模型构建

从生态产业链网结构的节点企业的立体网络形式探讨了生态产业链网结构内部协同关系,得出节点企业之间的生态协同生产会提高整个链网结构的效率。这些副产品交换等的协同关系使链网结构的整体资源和能力超过各个节点企业的综合,即创造出新增收益。创造性地从协同的角度将协同收益概念引入到生态产业链网结构的研究领域,并探讨了协同收益的主要来源。通过节点企业的进化博弈定量分析了协同收益分配是否公平合理决定了链网演化的稳定和方向。针对现有利益分配方法的局限,建立了包括生态技术水平、生态贡献、投入水平和承担的风险四个主要影响因素的协同收益分配因子,并以蒙西工业园区中的二氧化碳生态产业链为例,探讨了该分配因子的实际应用。

### 4. 生态产业链网结构有序的影响因素控制及其测算

本文将有序的概念引入到生态产业链网结构的研究领域,分析了影响生态产业链网结构有序运行的影响因素。采用投入产出方法从定量的角度探讨了生态产业链网结构在受到市场需求波动的影响下,能够调整内部的生产适应环境的变化。生态产业链网结构受到内在和外在因素影响时会表现出两个趋势:有序运动和无序运动。针对这种情况,提出了生态产业链网结构有序的测算方法,从结构和功能两个方面构建了结构熵和功能熵,定量测算生态产业链网结构的有序程度,并进行了实证研究。

## 1.3.2 技术路径

论文研究的技术路线如图 1-2 所示。

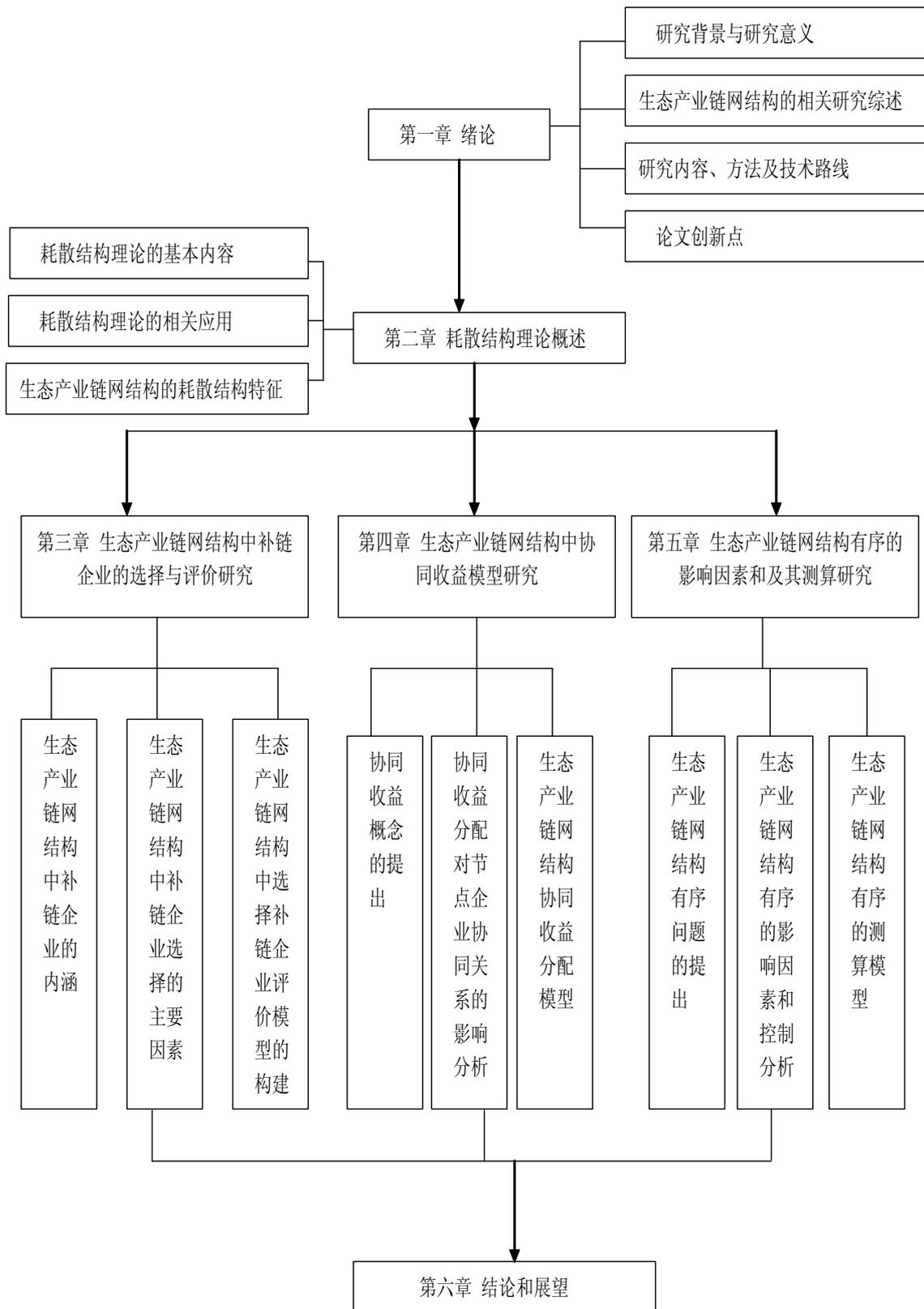


图 1-2 论文的研究路线

## 1.4 论文创新点

本文力求在以下几个方面取得创新:

### 1. 生态产业链网结构中补链企业的选择和评价分析

首先从生态产业链网延伸和发展的角度提出了补链企业的概念,对卡伦堡和贵港(制糖)国内外两个成功的生态工业园进行了探讨,从实践的角度分析了生态产业链网结构的发展过程引入补链企业情况。在此基础上,提出生态产业多样性是引入补链企业的主要依据,同时对生态产业链网的补链企业选取原则进行了定性分析。在研究国内外相关成果的基础上,建立了补链企业的评价指标体系,提出了将主观和客观赋权方法相结合的权重确定方法。由于可拓学中的优度评价法具有描述非满足不可的条件、用关联函数的正负值反映一个对象的利弊程度等优点,将其引入到生态产业链网结构的评价研究领域,构建了选取补链企业的评价方法。

### 2. 生态产业链网结构协同收益分配模型构建

从生态产业链网结构的节点企业的立体网络形式探讨了生态产业链网结构内部协同关系,这种协同关系使链网结构的整体资源和能力超过各个节点企业的综合,即创造出新增收益。创造性地从协同的角度将协同收益概念引入到生态产业链网结构的研究领域,并探讨了协同收益的主要来源。通过节点企业的进化博弈定量分析了协同收益分配是否公平合理决定了链网演化的稳定和方向。针对现有利益分配方法的局限,建立了包括生态技术水平、生态贡献、投入水平和承担的风险四个主要影响因素的协同收益分配因子,并以蒙西工业园区中的二氧化碳生态产业链为例,探讨了该分配因子的实际应用。

### 3. 生态产业链网结构有序的影响因素控制及其测算

本文将有序的概念引入到生态产业链网结构的研究领域,分析了影响生态产业链网结构有序运行的影响因素。采用投入产出方法从定量的角度探讨了生态产业链网结构在受到市场需求波动的影响下,能够调整内部的生产适应环境的变化。生态产业链网结构受到内在和外在因素影响时会表现出两个趋势:有序运动和无序运动。针对这种情况,提出了生态产业链网结构有序的测算方法,从结构和功能两个方面构建了结构熵和功能熵,定量测算生态产业链网结构的有序程度,并进行了实证研究。

## 第二章 耗散结构理论概述

### 2.1 耗散结构理论中的基本内容

#### 2.1.1 耗散结构理论的产生与发展

耗散结构理论与近代热力学有很深的渊源关系。1824年法国军事工程师卡诺<sup>[110]</sup>发表的《论火的动力及能够发展这种动力的机器》一文，被认为是热力学的基础。在该文献中第一次提出了了热转化为功的问题。1850年，克劳修斯<sup>[111]</sup>在分析热力学第二定律时，提出了“热量不能自动从低温物体转移到高温物体”重要结论。汤姆逊<sup>[111]</sup>在1851年针对热力学第二定律提出：“从单一热源吸收热量使之完全变为有用功而不产生其他影响是不可能的”。在1854-1865年间，克劳修斯<sup>[112]</sup>采用数学分析的方法对可逆循环和不可逆循环进行了深入研究，提出了“熵”这一重要的概念来描述系统中能量在不可逆形式转换中有效性的衰变，从此熵概念对许多学科产生了广泛而深刻的影响。

著名的“熵增加原理”指出熵与不可逆性密切相连，正是不可逆过程的单方向性，孤立系统内发生的实际过程只有一个熵增的方向。也就是说，一个自发进行的过程，必是一个熵值增加、有用能减少、耗散能增多的过程。尤其是孤立系统内部的熵增与系统内部存在温度梯度、密度梯度和化学反应势等不平衡现象相关联，这些梯度和势越大，系统内部的熵增就越明显。为了维持这些内部结构的存在，就越需要付出更大的努力。

1898年，玻耳兹曼<sup>[110]</sup>把熵和概率论联系起来，提出著名了关系式：

$$S=K\ln \Omega$$

式中， $K$ 为玻耳兹曼常数， $\Omega$ 为系统对宏观状态出现概率的量度，用系统宏观状态所包含的分子微观状态数或分子配容数来表示。对于孤立系统来说，随着熵的增加，对应系统向最大概然状态发展，最终熵取最大值，同时系统会达到平衡态。也就是说，孤立系统中自发进行的不可逆过程，会朝着概率增大和无序性增大的方向变化，这一运动过程会使系统内差异消失，结构瓦解。因此玻耳兹曼提出，熵的不可逆增加可看作是分子运动无序性（或混乱度）的增大，于是熵用来作为系统无序性的度量。

但是热力学第二定律和熵的概念引发出许多无法解释或解决的问题，主要体现在两个方面：

其一，宇宙“热寂说”。如果把宇宙作为一个孤立系统，按照熵增加原理，

宇宙演化最终将到达熵取极大值时的平衡状态，此时宇宙停止了进化和发展，从而进入一个死寂状态。也就是说，如果热力学第二定律适用于整个宇宙，这一学说确实是必然的结果。于是有学者认为热力学第二定律是从有限范围内的经验总结得出的，不能未经论证而推广到无限的宇宙；另外也有学者认为，是由于已有的宇宙模型不正确才导致错误的结论等。

其二，19世纪以来的化学、生物学、地质学和社会学等众多研究领域都揭示出世界不是单一的从有序到无序，而是多样性的丰富与复杂结构的形成，正在从简单走向复杂。如化学反应中生成的更复杂物质、达尔文的生物进化论、不断进步的人类社会等等，显然用熵增加原理中的系统趋于无序性增大的结论是无法解释说明的这些变化。

热力学根据系统与外部环境间的相互关系，把研究对象分为孤立系统、封闭系统和开放系统。孤立系统是不与周围环境交换能量和质量的系统，是一种理想条件下的研究对象。封闭系统是与外界环境无物质交换，但存在能量交换的系统。地球通过辐射与外界宇宙交换能量，所以地球可作为封闭系统。开放系统是与外界环境同时存在能量交换与物质交换的系统，如一个生物体、一个城市都是典型的开放系统。

热力学把系统内部引起并影响过程进行和过程速率的原因称作“力”，把过程进行的速率称为“流”。在平衡态区域，“力”和“流”都等于零。在近平衡态区域，“力”的作用相对较弱，并且“流”和“力”成线性关系，因此又被称之为线性区域。但是在远离平衡态区域，“流”和“力”之间的关系比较复杂，不能用线性函数来表征，这一区域被称之为非线性区域。

一般来说，平衡态与孤立系统是相对应的一类问题，而非平衡态与非孤立系统对应。经典热力学“熵增加原理”和“趋于无序性增大”的结论，对于孤立系统来说是成立的，但是不适用于非孤立系统。20世纪建立起来的线性非平衡热力学的“最小熵产生原理”证明在非平衡条件下，系统总熵的减少和热力学第二定律和熵增加的原理并不矛盾。

事实上，处在变化中的非平衡态是更多更普遍的情况，例如，在催化剂作用下的化学反应、生物的共生进化、政治经济系统的演化等都是这种情况。在这些系统中，不断增加的复杂化和有序性显然已经与玻尔兹曼有序原理不相容；系统所趋向的状态也不能以熵增加原理、最小熵产生原理来解释。

1969年，比利时普利高津<sup>[113]</sup>教授在一次“理论物理与生物学”的国际会议上提出了耗散结构的概念。1971年，普利高津与他人合著的《结构、稳定和涨落的热力学理论》中，比较详细地阐明了耗散结构的热力学理论，并将它应用到其他领域，如流体力学、化学和生物学等方面。1971-1977年，耗散结构理论的

研究又有了进一步的扩展,如用非线性数学理论和方法对系统的分岔现象进行讨论、从随机过程的角度解释系统的涨落和耗散结构的关系等方面的应用。普利高津创立的将时间与不可逆性联系起来的耗散结构理论,解决了热力学与进化论之间的矛盾,开辟了用物理、化学的非生命方法研究生物学的道路。。

1977年普利高津<sup>[112]</sup>等人所著的《非平衡系统中的自组织》中,对复杂系统的自组织现象进行了研究,发现复杂系统的有序程度的增加随着其进化过程而趋于复杂,并会产生各种变异。借助耗散结构理论中的进化过程时间方向不可逆问题,提出“非平衡是有序的起源”,并以此作为基本出发点,在决定性和随机性建立了相应的理论。

1978年8月中国物理学会、1978年年会统计物理分会、1979年8月第一届全国非平衡统计物理学术会议和1980年7月第二届全国非平衡统计物理学术会议上,都介绍和讨论了耗散结构理论的产生与发展情况以及研究成果,从此耗散结构理论逐步在我国学术界引起了重视。此外,以普利高津教授为首的布鲁塞尔学派开始与我国相关的学术界建立了密切的学术联系,如与我国理论物理研究所、北京师范大学、西北大学等单位的学者经常交流彼此的研究成果,促进了我国各方面研究工作的开展。

### 2.1.2 耗散结构的概念

经典热力学认为,系统的状态可分为平衡和非平衡两类。所谓平衡态是指构成系统的组分、要素在物质(如浓度)、能量(如温度)或信息分布上的均匀、无差异状态,这种状态在结构上是最无序的,也是无活力的。也就是说,如果系统内部无任何宏观过程,系统与外部环境之间也无物质和能量的交换,则认为系统达到平衡态。而非平衡态则是有差异、分布不均匀的。系统的有序结构只能产生在非平衡状态下。远离平衡态是形成新的有序结构的最有利条件。显然,平衡态是一种“死”结构的系统,内部没有任何宏观过程,与外部也没有物质和能量的交换。

系统的非平衡态有近平衡态和远离平衡态之分。系统的有序结构既不能从最无序的平衡态产生,也不能从近平衡态产生。因为平衡态就像一个吸引中心,它会使有序结构趋向于平衡态而遭到破坏并最终瓦解。因此,只有远离平衡态才有可能使原有状态失稳并进而产生新的有序结构。当然,这种有序结构必须要有足够的能流与物质流(保证形成负熵流)才可能产生、维持与发展。这种在远离平衡态条件下系统与外部环境相互作用而形成的新的有序结构,就是耗散结构。“耗散”一词表示这种结构只能靠时刻不断地从外部引进优质低熵的物质、能量或者信息并耗散为低质高熵的物质、能量或者信息来产生、维持与发展。

耗散结构是指一个远离平衡的开放系统通过不断地与外界交换物质和能量, 在外界条件的变化达到一定的阈值时, 可能从原有的混沌无序的状态转变为一种在时间上、空间上或功能上的有序状态。这种在远离平衡情况下所形成的新的有序结构, 它是一种稳定的时空有序结构, 由原来的无序结构, 靠外界不断供应能量或物质, 通过量变引起质的突变而形成, 普利高津把它命名为“耗散结构”, 它是一种自然现象, 广泛存在于自然界和人类社会中, 如物现学中的激光、化学中的自催化反应以及人体、生物、城市、社会等。

### 2.1.3 耗散结构的特征

耗散结构是在一定的条件下, 可能从原有的混沌无序的状态转变为一种在时间上、空间上或功能上的有序状态。所谓有序是指系统的不同时空点的有差别的情况。如一个容器中间有一隔板, 一半盛有空气, 另一半为真空, 这两部分是有差别, 也是有序的。所谓无序就是指该系统中任何两点在时空中是毫无区别的。当两部分之间的隔板抽掉后, 气体充满整个容器达到平衡时, 这两部分没有区别, 即是无序的。

序有两种类型结构序和功能序, 结构序又分为时间序和空间序两种。结构序标志事物或系统结构的规则性和顺序性, 表示系统内部各要素相互联系和作用的方式; 时间序是指系统发展变化时在时间上先后或同时的秩序; 空间序是指系统的空间分布规则。功能序是指系统与外部环境相互联系和作用过程的秩序和能力, 它体现了一个系统与外部环境之间的物质、能量与信息的输入或输出的交换关系。所以, 无序和有序关系如图 2-1 所示<sup>[112]</sup>。

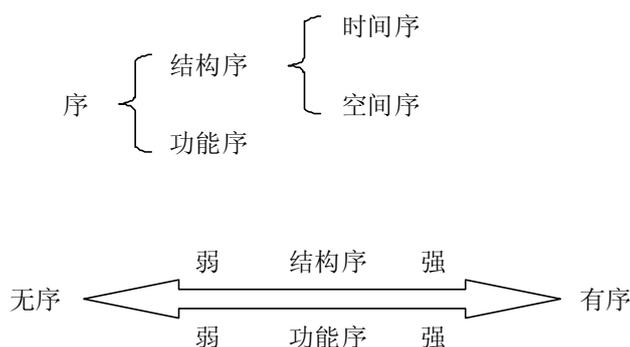


图 2-1 无序和有序的关系

耗散结构概念是对应于平衡结构的。一般来说, 平衡结构也是一种有序结构。但是耗散结构中的有序结构与平衡结构的有序结构有着本质的差别, 而耗散结构的特征就体现着这两类有序结构的本质差别中。

第一, 两类结构有序的空间尺度范围不同。平衡结构中的有序主要是指微观

有序，如晶体就是一种平衡结构。它们是由许多具有相同形状的基本单元（原子或分子）重叠形成的。也就是说，平衡结构内部有许多周期重复的有序结构。

耗散结构中的有序或生物有序，具有宏观的数量级，如可以用厘米或米量度。例如贝纳德对流中的各种花纹，都是用肉眼可以清晰地观察到的。

第二，稳定有序的平衡结构是一种“死”结构，也就是说这种结构一旦形成，不会随时间或空间的变化而变化。如系统内部的热运动，也只能使分子在平衡位置附近振动，不能破坏系统整体的状态；而稳定有序的耗散结构是一种“活”结构，是一种动态变化的有序，并且不断地在时间或空间中呈现出有规律的周期性变化。在贝纳德实验中，虽然对流花纹不随时间而变化，但构成花纹的每个流通分子在空间中进行着剧烈的定向运动，这就是一种“活”的结构。

第三，两种结构继续存在和维持的条件不同。任何系统都要受到外界影响，自然界并不存在严格意义上的不受外界影响的孤立系统。在平衡结构中，其稳定一旦形成，就可以在孤立的环境中维持，不需要从外界补充物质和能量，如储藏在与外界隔绝的容器中的晶体，只要温度足够低，不管储藏多长时间，总会保持规整的有序结构。耗散结构则不同，它必须在一个开放的系统中才能形成和维持。也就是说，它需要不断地和外界发生物质和能量的交换，才能维持其有序的状态，并通过这种有序状态耗散物质和能量。

由以上分析可以得出，耗散结构有如下特征：

动态性。耗散结构是一种动态结构，而不是静态结构。静态结构即指构成的物质、能量要素及其相互关系均不发生变化的结构，如晶体结构就属于静态结构。动态结构是指在系统结构关系不变的前提下，构成系统的要素不断的更新，如工业生产系统的物质和能量流动。并且系统是不断发生质变的，如人类社会经过不断的体制的变迁，内部结构不断改变，耗散结构就是指这类结构。

宏观性。耗散结构是一种宏观结构。这里的宏观是指由分子以上水平的物质要素的相互关联形成的结构。例如企业的组织结构就属于宏观结构，也是耗散结构。

有序性。耗散结构是一种有序结构，是指通过系统内部诸要素之间有规则的联系转化而形成的结构。如生物系统就是有序结构，生命过程的发育、生长和代谢都是依靠无数的生物化学反应的高度有序和协同实现的，没有这种有序性，生命就无法维持。

#### 2.1.4 耗散结构理论概要

比利时布鲁塞尔学派领导人普利高津等人通过长期研究发现，一个开放系统在达到远离平衡态的非线性区时，一旦系统的某个参量的变化达到一定的阈值，

通过涨落,系统可能发生突变,即非平衡相变,由原来的无序混乱状态转变到一种时间、空间或功能有序的新状态。这种有序状态需要不断地与外界交换物质和能量才能维持,并保持一定的稳定性,不因外界的微小扰动而消失。普利高津首次把这种在远离平衡的非线性区形成的新的稳定有序结构定义为耗散结构。

贝纳德试验勾画出了一个系统如何从平衡态到非平衡态、从无序有序、再到混沌的演化全过程。该试验的第三种状态,即贝纳德花纹的出现,就是一种典型的耗散结构。耗散结构理论就是研究耗散结构的性质、形成、稳定和演变规律的科学,突破了传统的物理学以封闭系统和平衡结构为主要研究对象的框架,以远离平衡的开放系统为研究对象,来研究系统与外界进行能量和物质交换,进而形成和维持稳定化的宏观系统结构,即非平衡状态下宏观系统的自组织现象。在不可逆过程的开放系统的耗散中,系统存在着从简单到复杂、从无序到有序、从对称到破缺的进化过程,这种过程在不违背热力学第二定律的前提下,可以和生物进化论所揭示的方向一致。这样,耗散结构理论把热力学第二定律与达尔文进化论统一在更为广泛、更为普遍的理论中。文献<sup>[110-115]</sup>将耗散结构理论概括为开放性、远离平衡态、随机涨落和非线性等核心内容,本文归纳如下:

### 1. 系统的开放性是有序结构的基本条件

一个孤立系统,初始时在各个部位的热力学参量(温度、气体密度等)可能具有不同的值,这些参量会随时间变化,最终将达到一种不变的状态(或称为定态),这种定态就是平衡态。孤立系统一旦达到平衡态,它就永远不会自发地离开这种状态。(除非外界影响强迫它,而一旦有外界影响,它就不再是孤立系统。)不但孤立系统会达到平衡态,开放系统也可能达到平衡态。如敞开容器中的水是开放系统,如果外界空气的温度、压强近似地均匀,而水放置了足够长时间使它与外界达到相同的温度,且不再变化,这个稳定状态也近似于平衡态。

因此,由经典热力学定律可知,孤立的系统只会产生一种趋势:最终到达平衡态。否则,必须靠外界供给的物质、能量,才能获得维持生命的活力,特别在生物界,生物体如果不从外界不断地吸收、耗散物质,它就不能维持生命,只能是死亡。此外,在只有能量交换而无物质交换的封闭系统中,遵守的也只是玻耳兹曼原理。因此,开放系统是产生形成有序结构的首要必备条件。

无论是受外界影响的孤立系统,还是与外界仅有能量交换而无物质交换的封闭系统,都只能自发地走向最无序的平衡态,只有与外界既有能量交换又有物质交换的开放系统才能发生耗散结构的自组织现象。

由热力学第二定律得出,一个孤立系统的熵一定随时间增大,熵达到极大值,系统达到最无序的平衡态,也就是说,系统最终一定达到一种除了分子的无规则

热运动以外,内部没有任何规则的宏观运动,时间和空间熵没有宏观差别的状态。因此,孤立系统不会出现耗散结构,即使原来的系统存在耗散结构,一旦系统被孤立,这个结构就会瓦解。

开放系统与孤立系统的本质区别是系统与外界之间有熵的交换。普利高津指出,对于一个与外界有物质和能量交换的开放系统来说,熵的变化可以分为两部分:一部分熵系统本身由于不可逆过程引起的熵增加( $d_iS$ ),且有 $d_iS$ 为非负;另一部分是系统与外界交换物质和能量引起的熵流( $d_eS$ ),这一项可以大于、小于或等于零,因此整个系统的熵变化 $dS$ ,由两部分组成<sup>[110,112]</sup>:

$$dS = d_eS + d_iS \quad (2-1)$$

根据热力学第二定律,恒有 $d_iS \geq 0$ 。在 $d_eS < 0$ 的情况下,只要有 $dS = d_eS + d_iS < 0$ ,除了抵消系统内部的熵增 $d_eS$ 外,还能够使系统的总熵 $dS$ 减少,从而使系统进入相对有序的状态。即使是 $dS = 0$ ,系统也可以维持一个低熵的非平衡定态的有序结构。需要说明的是,系统与外界内外有别,不可能对外界全面开放,否则,系统就成为环境或另一系统的组成部分,也就丧失了相对独立性。

## 2. 远离平衡态是有序之源

“非平衡为有序之源”是耗散结构理论的一个重要思想。耗散结构理论认为系统的状态可分为如图 2-2 所示的状态:

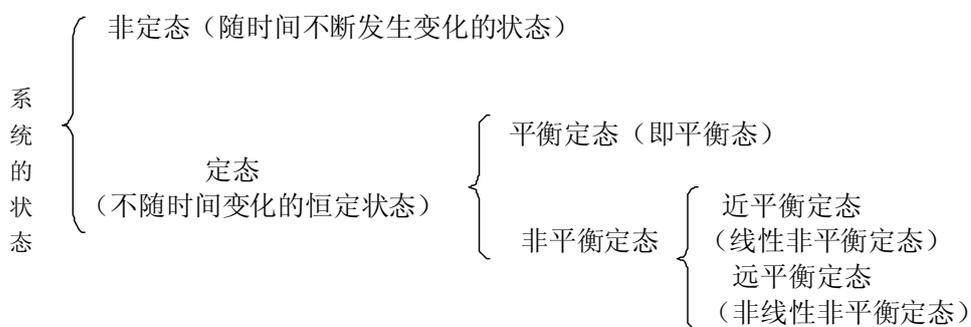


图 2-2 系统的状态

普利高津认为,从一种无序状态变成一种有序状态的过程,可以看作是系统原来的无序状态失去稳定性的结果。系统状态的不稳定是产生自组织的前提,无论是在平衡态还是平衡态附近的区域,系统自身都不会失去原有状态的稳定性,只有在远离平衡的非线性区,系统原有状态才有可能成为不稳定的,从而为建立新的有序结构提供了可能性。

开放系统仅仅是形成耗散结构的一个必要条件。普利高津指出,一个开放系统可能由三种不同的存在方式:热力学平衡态、近平衡态或线性非平衡态以及远

离平衡态。对于这三种方式，耗散结构理论证明，不仅平衡态不能导致有序，即使系统处于离平衡态不远的近平衡区，虽然与外界有物质和能量的交换，其自发趋势还是要回到平衡态，处在平衡态和近平衡态（线性区）的开放系统不能产出新的耗散结构。因此出现耗散结构另一个重要条件是外界必须驱动开放系统超出非平衡线性区，到达远离平衡态的区域。正是在这个意义上，普利高津得出了“非平衡是有序之源”的结论。

耗散结构理论表明，系统偏离平衡的程度可由系统内产生的“流”和“力”的强弱来表征。各种经济变量由于分布不均匀而产生的梯度称为力，这些经济量的流动称为流，对应于热力学的三种状态：系统处于热力学平衡态时，系统内部的“流”和产生流的“力”都为零；近平衡态，熵产生的力与流呈线性关系，系统熵产生将减少，以抵消负熵流，直到力与流相互完全抵消，系统的熵最小，这就是普利高津推导出的近平衡态的一个重要定律—最小熵产生原理，处在平衡态或近平衡态的系统总是朝着平衡态或近平衡态的方向演化，即朝着无序、均匀、低级和简单的方向发展。要远离平衡态，系统必须处于非平衡非线性区。非平衡过程的“流”不仅取决于该过程的推动“力”，还会受到其它非平衡过程的影响，也就是说，不同的非平衡过程之间存在某种耦合。用  $J_k$  表示系统内某种流， $\{X_i\}$  表示系统中各种力，则  $J_k$  是  $\{X_i\}$  的函数： $J_k = J_k(\{X_i\})$ 。

以平衡态为参考态将  $J_k = J_k(\{X_i\})$  展成泰勒展式<sup>[113]</sup>：

$$J_k(\{X_i\}) = J_k(\{X_i, 0\}) + \sum_i \left( \frac{\partial J_k}{\partial X_i} \right)_0 X_i + \frac{1}{2} \sum_{i,m} \left( \frac{\partial^2 J_k}{\partial X_i \partial X_m} \right)_0 X_i X_m + \dots$$

系统远离平衡时，展式中的非线性的高次项使“力”和“流”之间为非线性关系。在一定外界参量的控制下，熵值不断减少，最后稳定在一种较平衡态熵低的有序状态。也就是说，系统内部物质和能量分布极不平衡，差距很大，使力与流呈非线性关系，这时负熵流产生一个不断增大的加速度，系统的总熵  $dS$  有一个不断减小的趋势，从而系统处于远离平衡的状态。由此可知，系统远离平衡时，由于非线性的耦合作用，各种“力”对某种“流”都有贡献，系统各要素之间形成相互依赖、协同发展的状态。

### 3. 涨落导致有序

开放性和非平衡性是形成耗散结构的外部条件，系统演化真正达到质变，还需要内部条件，同时，外部条件也只有通过内部条件才能发挥作用。一个由大量子系统组成的系统，其可测的宏观量是众多子系统的统计平均效应的反映。但系统在每一时刻的实际测度并不都精确地处于这些平均值上，而是或多或少有些偏差，这些偏差就叫涨落。

耗散结构理论指出,产生有序结构的内部诱因就是涨落。任何一个系统都是由大量微观元素组成的。各个微观元素的运动总会在局部上造成与宏观平均态的微小偏离。这种暂时的微小偏离称之为涨落,即涨落是系统中某些变量的行为对平均值发生偏离,它能使系统离开原来的状态或轨道。由于系统失稳或局部范围不稳定的涨落运动,和各种子系统的局部耦合关系与运动特性相联系的模式或参量异常活跃,使各种变量的涨落此起彼伏。当系统达到不稳定点时,各种参量或模式相互竞争的结果使整个系统呈现出某种协同一致的有序时空和功能行为。

涨落是偶然的、杂乱无章的、随机的。在正常情况下,由于热力学系统相对于其子系统来说非常大,这时涨落相对于平均值是很小的,即使偶尔有大的涨落也会立即耗散掉,系统总要回到平均值附近,这些涨落不会对宏观的实际测量产生影响,因而可以被忽略掉。然而,在临界点情况就大不相同了,这时涨落可能被不稳定的系统放大,最后促使系统达到新的宏观态。

当系统处于不同状态时,涨落所起的作用会迥然不同,这就是涨落的两重性。普利高津认为,“在耗散结构里,不稳定之后出现的宏观有序是由增长最快的涨落决定的。在临界状态下,涨落有可能被反馈放大为“巨涨落”<sup>[112]</sup>,从而导致系统从不稳定跃进到一个新的有序状态,即耗散机构的出现,因此,任何一种稳定有序的状态,都可以看着是某种无序状态失去稳定性而使某种涨落放大的结果。

系统的发展变化可分为组织和自组织两种,组织常理解为由外部调节作用决定的系统协调行为或功能,自组织则表示在开放系统中,系统仅依据其内部联系和按照自身的历史,各组成部分之间自发地具有内部的协调功能。系统通过“自组织”形成新的稳定结构。在平衡态下,分子表现得相对独立,而在远离平衡态的非线性系统中,分子之间产生了相干性,就有某种“通讯”联系进行信息传递,以致每个分子的行为都与整体的状态有关。这时系统的一个微观随机的小扰动,就会通过相干作用得到传递和放大,使微观的局部的扰动发展成为宏观的“巨涨落”,使系统进入到不稳定状态。在这种状态下,系统各要素之间相互协同作用,寻求着信息深层结构的内在联系。一旦某种信息之间建立了精约同构(即两种事物深层次里具有的少而精的共性)的联系,系统就会由无序的不稳定状态跃迁到新的、稳定的有序状态。

#### 4. 系统具有非线性作用机制

一般一个系统内各要素之间的作用分为线性和非线性的。对于线性作用,它具有加和性,每个小的作用性质、行为是相同的,没有制约性,不可能产生新的性质和结构。只有靠系统内部众多的具有相干性和制约性的非线性作用,才能形

成有序的耗散结构。非线性作用是形成耗散结构的重要条件之一<sup>[111]</sup>。

系统间或系统要素之间的相互作用主要分为两种：一种是用线性方程或线性微分方程表示的简单作用；另一种用非线性方程或非线性微分方程表示的复杂作用。线性和非线性所具有的特性如表 2-1 所示。

表 2-1 (子) 系统的线性和非线性特性

系统或系统要素的线性特性	系统或系统要素的非线性特性
孤立性：各种作用相互独立	相干性：整体大于部分之和
均匀性：无时空特征	非均匀性：相互作用的方式和效益随着时间、地点、条件不同而不同
对称性：相互作用的两点在效果是对称的	非对称性：相互作用的对象是支配与从属、催化与被催化的关系

并不是只要满足了开放性、非平衡性和涨落三个条件，系统就一定会自发地形成和维持耗散结构。例如人体作为一个开放系统，不停地输入营养和空气，即总是与外界保持物质和能量的交换，另外，人体和环境之间的不同结构等因素的存在，也处于非平衡状态，同时人体内的随机涨落每时每刻都在发生，但是只有这些条件，人体不一定能维持正常的生命。还必须有消化和吸收等体内的新陈代谢过程，这种过程就是人体内的一种非线性相互作用。同样，在物理的、化学的、生物的等系统中，内部各要素之间存在着非线性相互作用，只有通过非线性相互作用，才能使系统的各个要素之间产生协同作用和相干效应，才能使系统从无序变为有序，从而产生耗散结构。在非线性区，系统在外部控制条件达到某一特定值时会成为不稳定的状态，系统演化会出现分支现象，才可能产生稳定的耗散结构分支。

系统内部各个要素之间存在非线性的相互作用是新的有序结构形成并得以保持的内在根据。系统要形成新结构，构成系统的各要素之间既不能是各自孤立的，也不能仅仅是简单的线性联系。因为线性关系是一系列不稳定状态的序列与集合，系统只能处于一种永无止境的发展变化之中，得不到片刻的稳定与安宁。同时，客观世界由于受环境资源的限制，不容许任何系统以线性的方式无休止地向前发展。因此，只有在系统的各要素之间存在非线性的相互联系和相互作用，才能使它们产生复杂的相干效应和协同动作，使促进的力量与促退的力量形成暂时的均衡。系统进入某个暂时的稳定状态，进而形成与这一状态相对应的新的有序结构并得以维持。

## 2.2 耗散结构理论的相关应用

### 2.2.1 耗散结构的普遍性

长期以来,人们把对自然界的研究同对人类社会的研究严格区别开来,前者称为自然科学,后者称为社会科学。普利高津的耗散结构理论告诉我们,耗散结构不仅存在自然领域如物理化学和生物学系统,而且也普遍存在于人类社会的各个领域如人口系统、城市系统、经济系统和教育系统,该理论在各个领域的有效应用,也使自然科学和社会科学得到了有效的统一。

耗散结构理论作为一种横跨整个自然科学和社会科学的理论工具,是普适性理论,具有广泛的重要的科学意义。无论是自然系统还是社会系统,都随着时间的推移不断演化。按照耗散结构理论,对于一个开放的系统,在远离非平衡态的情况下,通过系统内部要素的相互作用,自发从无序走向有序,从有序走向新的有序,这个过程就是系统自组织演化的过程。系统的演化是自组织的,不是外力和人为的因素推动事物发展变化的。自组织是事物自身发展所选择的最优化的方式,这种方式无论在效益上还是在结果上都优于其它进化的方式。

在自然科学领域,事物自组织演化不难理解。同样,融入了人的主观因素的任何经济系统也都是一个开放的系统,只不过不同经济系统的自组织程度不同而已,从理论上都可以形成一个耗散结构。例如在社会领域中的各种组织机构都可以认为是具有不同层次耗散结构的体系,普利高津认为,社会进化固然有其自身的特点,然而从根本上说也是物理宇宙进化的一方面,因此为了形成和保持自组织的有序结构都可以运用耗散结构理论来研究。

### 2.2.2 耗散结构理论在人文社会科学领域中的应用

随着现代社会高度的物质流通度和信息化水平的提高,社会的时空有序和自组织表明它也是一个开放系统的耗散结构,因此可以运用耗散结构理论来进行经济建设、市场管理、人口控制、生产服务等人文社会科学领域的研究,本文主要从经济学和管理学两个领域来探讨耗散结构的应用。

#### 1. 经济学领域

耗散结构理论运用得较多、较成熟的人文社科领域是经济学领域,经济学,尤其是古典经济学,主要是从均衡的视角研究经济现象。近些年来,现代物理学中有关耗散结构的理论逐渐应用于经济学领域,产生了一门新的学科,即非平衡系统经济学,又称为开放系统经济学。它的主要任务是用现代系统理论和系统分

析方法研究各种经济系统的非平衡现象和规律。

项清焕<sup>[117]</sup>引用耗散结构理论对区域社会经济系统进行研究,建立了区域社会经济系统熵公式,在此基础上探讨了区域社会经济系统相变的扰动因素及其扰动结果、非平衡态及其驱动方向,提出了它的发展与社会、生态相适应的耗散结构模式;

胡传机<sup>[118]</sup>引用耗散结构理论对信息市场的特征进行研究,提出了信息市场健康发展的可行性对策;

李崇阳、王龙妹<sup>[119]</sup>以“序”的概念来刻画产业系统耗散结构问题,同时用“熵”来标识序度,从产业系统的稳定性和可变异性、子系统的协同与竞争、产业系统的优化等方面探讨了产业系统的发展与演化机制。

赵叔平、刘昌<sup>[120]</sup>在分析西方经典经济理论的局限性的基础上,提出一个基于耗散结构理论的经济模型,试图解释当前重大的国际性问题诸如世界性通货膨胀、大规模失业、经济危机周期的不稳定性等问题。

国外已出现运用复杂系统分析宏观经济数据,主要集中于对经济周期、宏观经济现象的复杂性进行研究。另外,在综合国力的研究中,借助耗散结构论,论证了国家综合国力的盛衰是一种混沌现象,是一个庞杂的、非线性的动态系统,它具有蝴蝶效应、分形几何、临界状态、奇怪吸引子、普适件、自组织性、非线性等特征。

## 2. 管理科学领域

在理论研究方面,马步瀛、吉国玲<sup>[121]</sup>运用耗散结构理论研究了我国国有企业的创新问题。认为国有企业系统的系统动力机制和系统运行机制未真正形成,导致我国许多国企处于近平衡状态,致使系统自组织能力不强,涨落总是被系统自身阻尼掉。认为要使国有企业系统远离平衡状态,必须继续深化企业改革,解决深层次矛盾,积极创造条件,建立现代企业制度,进一步解放和发展生产力,才能逐步形成耗散结构的经济系统。

胡继灵<sup>[122]</sup>应用耗散结构理论对高新技术企业管理进行了研究,提出了开放性、整体性、动态性、非平衡和驾驭涨落等管理原则。

孙继维<sup>[123]</sup>在分析产业企业的生存与发展问题时,提出了耗散结构体理论作为耗散结构理论的补充和发展。

在企业具体管理方面,被誉为“南南合作典范”的中国—阿拉伯化肥有限公司,以耗散结构理论为指导,建立“精神动力+制度约束+饱满工作量”的管理模式和一系列的管理制度,取得了良好的效果。

## 2.3 生态产业链网结构的耗散结构特征

### 2.3.1 生态产业链网结构是一个包含众多节点企业的开放系统

生态产业链网结构是由多个节点企业通过副产品或废弃物交换形成的一个生产系统，在这样的一个市场环境下，每个节点企业首先是一个开放系统，不断地与外界环境进行物质、能量和信息的交换。这些节点企业与传统意义上的企业相似，最基本的活动就是“投入-产出”：一方面是原材料和能源（或者是副产品和废弃物）的输入，另一方面通过加工生产形成产品，在市场上或与下游企业进行销售。输入和输出的活动一旦静止下来，企业内部的所有秩序和结构就会崩溃瓦解。同样的道理，生态产业链网结构在发展演化的过程中，必须不断地与外界环境之间进行着物质、能量和信息的交换。

因此同自然生态系统一样，生态产业链网结构只有开放才能补充必需的能源材料、接受外来的技术扩散、才能获得必要的市场信息、同时向链网外部输出产品和服务以交换链网赖以生存的经济资源。生态产业链网结构的开放性体现在两个层面：一是生态产业链网结构及其各节点企业都有边界，通过边界与其他节点或环境进行资源交换、信息交换、能量交换等相互影响、相互作用，这种交换贯穿于生态产业链网结构的整个生命过程。如节点企业从链网外面吸收资金、原材料、劳动力等生产要素，引进生产技术，生产产品，最后产品被输出链网，输入到消费市场环境中参加流通和竞争。二是生态产业链网结构的各生产过程是相互关联的，一个生产过程的副产品或废物可以作为另一个生产过程的原料加以利用，这种交换活动正是生态产业链网结构存在的前提。在整个生态产业链网结构中的每一个环节都会有物质和能源的流动，这些物质和能源的流出会成为下一级节点企业的原材料或能源投入生产，同样，节点企业也会产生工业剩余物，包括作为原材料的剩余物（如固体废弃物、废水、废气等）和作为能量的废弃物（如热蒸汽、水等），这些剩余物也会成为下一级节点企业的生产原料，在一定程度上解决下游企业原材料和能源的来源问题，从而提高其经济效益，同时节省了上游节点企业的处理废弃物的部分费用、废弃物的交通费用和废弃物交易费用。以此类推，形成循环。

### 2.3.2 生态产业链网结构是一个远离平衡态的系统

根据上述分析，我们可以得出：在热力学中，平衡态指的是系统如下状态：由于在空间上各处均匀无差异，系统内不存在任何宏观迁移过程。例如，一个流体力学系统，由于各处温度均匀无差异，其内部不发生热流。相反，非平衡态指

的则是系统的如下状态：由于在空间上存在某种不均匀即差异，系统内发生着某种宏观的迁移过程。例如，一个流体力学系统中由于温度在不同局域的不均匀即存在温度差，其内部会发生某种宏观的热对流。

远离平衡态具体表现为系统内部的各子系统存在较大的差异，这种差异不仅表现在数量上的差异，而且在性质上相互独立，功能上相互补充，也就是说，系统内存在势能差。孤立系统内的任何不均匀随着时间推移都会逐渐消失，更不可能自发的产生任何不均匀。因此，系统内任何不均匀的产生都只能靠系统自身演变或与外部环境开放，进行物质或能量交换，驱使系统产生并维持某种宏观的迁移过程。这样，如果把系统内部宏观上的各种迁移过程看作广义的“流”，那么造成的系统内部的不均匀则可以看作是造成这种“流”的“力”。以图 2-3<sup>[124]</sup>为例，做具体说明。

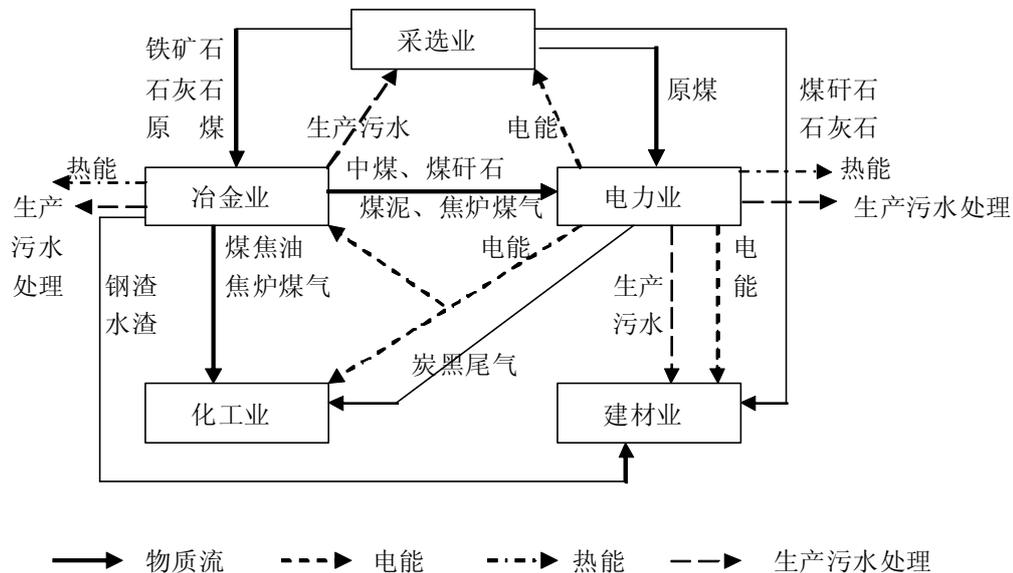


图 2-3 陕西韩城市龙门生态产业链网结构中的产业

龙门生态产业链网结构内现有重点企业 50 多家，按行业可分为五类采选、冶金、能源、化工和建材。采选业包括煤炭采选、铁矿采选、石灰石采选，冶金业主要包括炼焦业和钢铁业，化工业包括炭黑、煤焦油及甲醇等生产企业，建材业包括水泥厂和砖厂两类企业。远离平衡态即系统的各子系统有较大的差异性，这种差异性在生态产业链网结构中表现在节点企业的生态产业多样性，链网中分工导致专业化，专业化程度越强，节点企业的数量和种类越多。相互之间功能上的互补性和差异性产生了的各种“力”（梯度），它们动态的推动着各种“流”（物质流、能量流、水资源流和信息流）的运动，在龙门生态产业链网结构中的各种“流”如图 2-3 所示。

在由多个节点企业通过副产品或废弃物交换形成的生态产业链网结构中，造

成这种“流”的前提是节点企业发展的差异性。如企业之间功能不对称所导致的发展差异（如利润、市场份额等）；以及节点企业在综合实力、品牌声誉、学习能力和适应能力等方面不对称所导致节点企业在发展上的差异性。

节点企业在链网的运行和发展过程中扮演着不同的角色，它们的企业性质和类型决定了在链接中的地位和作用，在物质、能量、人才、技术和信息等资源方面不可能处于同等的位置。每个节点企业的发展都要依靠一些资源，包括核心资源和辅助资源，这些资源原本分布就是不平衡的。其中的各个企业在获取利润这一目的的驱使下积极创造价值。创造价值的能力就是获取资源的能力以及资源转化能力。企业首先要获取产业所依赖的核心资源，然后运用自己的资源转换能力使之产生价值。但是企业资源转化能力是不同的，比如，有的企业转化生产资源的能力较强，有的企业转化知识资源的能力较强。企业在资源的价值和本身转化资源的能力两种条件的综合作用下，获取不同的资源，资源不断的流动，造成生态产业链网结构的非平衡状态。

### 2.3.3 生态产业链网结构内存在协同作用机制

对于节点企业来说，从“经济人”视角来追求自身收益的最大化。因此，它加入生态产业链网结构的最终目标是能够使自身的收益最大化。众多的节点企业通过副产品或废弃物的交换形成链接关系，使得生态产业链网结构具有了各个节点企业所不具有的功能，使节点企业降低了成本或者提高了收益，同时减少了废弃物的排放，实现了整个链网的环境效益。也就是说，节点企业在追求收益最大化的同时，提高了其环境绩效，减少了对社会的负面影响，从而提高资源和生态效率成为了节点企业建立协同生产关系的主要目标，生态产业链网结构具有了“整体大于部分之和”的显著特点。这个特点也正是体现了链网内部的非线性作用机制，因为如果是线性作用，链网应该具有整体等于部分之和。

耗散结构理论将“整体大于部分之和”的非线性作用定义为协同作用，这种协同作用正是系统自发地对其子系统进行组织和协调的固有能力和能力。在生态产业链网结构中，节点企业之间在不同企业排放同种废弃物和同一废弃物被不同企业利用的过程中形成了多条类似“食物链”形式的相互依存、相互作用的生态产业链。在经济利益的驱动下，节点企业会主动的利用废料进行生产，上下游企业间为了经济利益而协同生产。这种生态协同的存在，微观上可以促进节点企业生产效率的提高，宏观上可以提高整个链网的运行效率，这种协同作用促使链网朝着功能更完善或更高的有序结构发展。

### 2.3.4 生态产业链网结构内存在涨落

耗散结构理论认为，系统状态不仅是子系统状态的总和，而且是一个综合平均的效应，众多的子系统在环境不断的影响下运动状态不断改变，使整个系统的状态也不断改变。系统中某个变量或行为对平均值所发生的偏离，整个系统演化呈现出微涨落和巨涨落的方式。在系统控制参数取某些值、系统处于稳定状态时，涨落相对于系统宏观量是微不足道的，这种情况下系统稳步发展并且在时间或范围上具有一定的持续性，也就是说系统在量的方面持续变化；在系统演化过程中的某一个时间点上，当外界条件的突然改变和系统内部的渐变过程积累到一定程度时，一些微不足道的偏差将会导致整个系统完全不同的发展途径，系统可能形成不同类型的结构，这意味着系统性质发生根本性改变。

系统的动力学方程可表示为： $\frac{dX}{dt} = f(X, \lambda)$ 。其中， $X$  为系统状态参量， $\lambda$  为控制参量。 $X$  随  $\lambda$  的变化，系统将会出现图 2-4 所示的涨落现象。

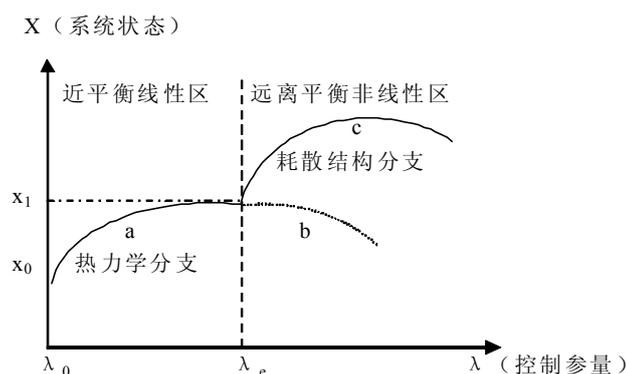


图 2-4 系统状态的涨落现象

图中平面上每一点代表系统的一种可能的状态， $(\lambda_0, \lambda_e)$  区间是近平衡线性区， $\lambda \geq \lambda_e$  区间是远离平衡非线性区。与  $\lambda_0$  对应的  $x_0$  表示平衡态，随着偏离  $\lambda_0$ ， $X$  的值就偏离平衡态，如果偏离较小，系统会演变到近平衡态的非平衡定态（曲线 a），这是平衡态的延伸，当控制参量  $\lambda < \lambda_e$  时称为热力学分支。这一分支，如果不能存在较强的外在此条件，其倾向是趋于无序和平衡。在  $\lambda_e$  的附近， $(x_1, \lambda_e)$  为临界点，系统越来越偏离初始状态，热力学分支 a 的延续 b 分支（用虚线表示）变得不稳定，一个很小的扰动就会导致系统离开热力学分支跳跃到某个稳定分支 c 上，系统内部微小涨落将被放大，成为宏观的巨涨落。 $\lambda \geq \lambda_e$  时，新分支上每一点对应着系统的某种时空有序结构，称为耗散结构分支。

传统工业类企业通过“高投入、高消耗、高排放”拉动经济增长，但是自然环境仅仅被当成资源、载体和废弃物消纳者，忽视了资源与生态环境的稀缺性。传统工业的线性发展模式致使排放的大量废弃物造成环境质量的恶化，导致资源

供给的减少、环境容量的降低，使有限的资源、环境变得更加“有限”，直接影响到自然环境的生态平衡，人类的生态安全也将因生存环境的生态承载力下降而受到威胁。

生态产业作为一种最新的产业模式，是仿照物质循环和再生利用的自然生态过程来规划工业系统的。在生态产业系统中，一系列企业以资源再循环为原则，通过企业内部污染预防和企业间共生合作来实现传统的非链接模式下无法获得的收益，包括减量化使用资源实现废弃物产生量的最小化，将回收报废产品中的原料再加工利用减少资源消耗、提高资源利用率。

因此，传统的工业模式就是图 2-5 中曲线 a 表示的热力学分支，如果没有政府环境监控机制、激励和惩罚机制等控制参量的影响，必然趋向于无序和平衡，不可能长期发展下去。当绿色技术的采用、生产方式的转变、生态链接技术的出现等控制参量的作用下，传统的工业模式就偏离初始状态，发生失稳现象，最终发生突变，从无序状态转变到有序状态，跃变到耗散结构分支 b 上，即最新的生态生产模式。

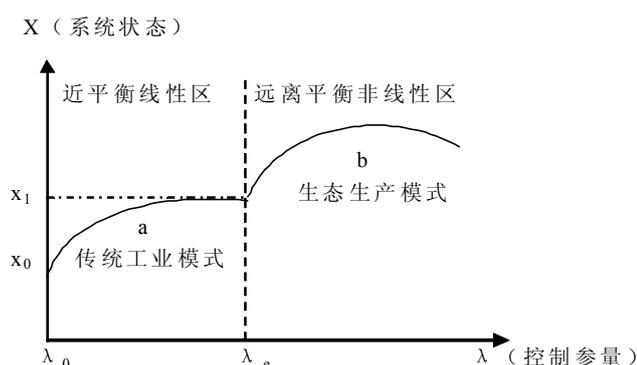


图 2-5 生产模式的涨落现象

涨落机制对于由多个子系统组成的系统是客观存在的，各子系统之间在相互作用过程中必然出现误差或偏差，也就是说，没有涨落也就没有系统的发展。生态产业链网结构作为一个宏观系统处在一个不断变化的环境中，不可避免地要受到各种外界因素的影响和制约，在适应过程中生态产业链网结构内部也存在着微涨落因素。首先，外部环境的变化，如社会环保意识的加强、政策调整等，会对链网产生扰动，从而导致链网的结构、功能、规模等方面出现变化；其次，内部扰动的出现。在链网内实施的技术、知识、政策、管理等方面的创新，使节点企业在节约生产成本、减少污染排放、提高物质利用效率和管理效率的过程中，会淘汰、消除物质消耗多、污染严重的落后企业，必然会导致链网中某些节点企业退出以及新的节点企业的进入，这些因素对导致链网在发展过程中出现不稳定的现象。

根据上述分析可以看出，从长期来看，处于发展初级阶段的生态产业链网结

构的这种有序结构，会受到各种各样的消极干扰因素，因此链网内部需要建立各种抗干扰的措施，促使节点企业的沟通和协调，从而使生态产业链网结构自身目标在环境的变迁中而不断适应与调整，以保持目前结构的平稳发展。

### 第三章 生态产业链网结构中补链企业的选择与评价研究

生态产业链网结构通过上下游主、副产品和原料的交换链构成一定的链接关系,但是随着生态产业链网结构的发展或者经济环境的变化,其中的某一产业链的某一环节可能出现断裂、或者在功能上需要延伸,这时就需要有新的企业替补进来,否则的话,核心企业也不可能顺利发展。本章将这类替补企业界定为补链企业,补链企业对于生态产业链网结构的发展壮大起着承上启下的作用,既有利于充分利用区域资源,也有利于提高生态产业链网结构的抗风险能力。

因此,深入研究补链企业的选择和评价问题是极为必要的,但目前大多文献的研究成果主要从宏观的角度探讨构建、规划和链接设计等问题,鲜有文献从相对微观的角度对补链企业的选择和评价做出深入研究,因此本章针对这一研究不足,在研究国内外相关成果的基础上,建立了补链企业的评价指标体系,提出了将主观和客观赋权方法相结合的权重确定方法。由于可拓学中的优度评价法具有描述非满足不可的条件、反映一个对象的利弊程度等优点,将其引入到生态产业链网结构的评价研究领域,构建了选取补链企业的评价方法。

#### 3.1 生态产业链网结构中补链企业的内涵

##### 3.1.1 生态产业链网结构中补链企业的概念

生态产业链网结构<sup>[128]</sup>一般是指依据生态学原理,以恢复和扩大自然资源存量为宗旨,为提高资源基本生产率和根据社会需要为主体,对两种以上产业的链接所进行的设计或改造,建立一种甲企业的废物是乙企业的原料,乙企业的废物又成为丙企业的原料依此类推的新型的产业系统,把不同企业产生的废物利用到不同阶段的生产过程中,使污染在生产过程中被减少甚至清除。

生态产业链网结构实现了资源、信息和能量闭环高效流动进行物质、信息和能量的交换、废物和副产品等资源的循环利用,降低系统内物质、能量流动的比率,减小物质、能量流动的规模。也就是说,生态产业链网结构通过调整内部节点企业资源与能量的“力”与“流”,利用不同企业之间的共生以及与自然生态系统之间的协调来实现资源的共享,物质、能量的多级利用以促进本身的高效产出与可持续发展。

从工业剩余物的交换模式来看,生态产业链网结构由起初的一个企业单向输出,逐步演化为与其他共生企业之间的双向输出,形成系统内相互的物质交换模式,一条条类似于自然界生态系统食物链的生态产业链将多种资源和能源链接成

一个相互依存、相互制约、互利共赢的整体，物质和能量沿着生态产业链梯级流动，原料、能源、废物、剩余物以及环境要素之间形成一个立体环流结构。

根据以上分析，本文对补链企业做出如下的定义：补链企业是指生态产业链网结构构建时为核心企业提供原料和能源或者以核心企业的废弃物或副产品作为原材料的节点企业，或者生态产业链网结构在发展过程中某生态产业链条出现断裂或延伸时需要引入的节点企业。一方面生态产业链网结构在构建或发展过程中对原料和能源有大量需求，需要有一定数量的补链企业与之配套；另一方面由于技术的提高或正产品种类的变化等原因，其内部某生态产业链条产生新的副产品和废物，也需要引入补链企业，使生态产业链网结构得以延伸和稳定发展。图 3-1 所示为生态产业链网结构构建时核心企业的补链企业。

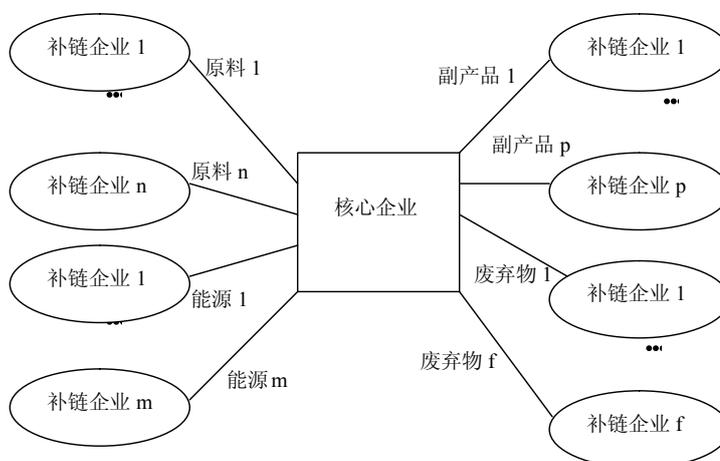


图 3-1 核心企业的补链企业示意图

### 3.1.2 生态产业链网结构中引入补链企业的实例分析

本文认为生态产业链网结构是在生态工业园区内，结合区域经济发展的实际，基于成熟的产业规划基础上，借鉴并运用自然生态规律，人为构建起来的，以废物和副产品为纽带，最终实现资源、能源等在区域范围内循环利用，经济效益、环境效益和社会效益最大化的工业生态系统。

生态产业链网结构与自然生态系统之间的物质和能量的交换以不间断的物质流、能量流和信息流为主要特征，构成了系统的开放性。生态技术的应用和产业链的链接，不但使企业内部的各部门之间物质、能量和信息的交换增加，而且使不同节点的企业之间物质、能量和信息的交换的得到强化，系统的开放性不断地趋于远离平衡态。

在一个特定的生态环境中，可利用的资源种类和数量总是有限的，如果一种

物种在长期的生存竞争中适应了周围环境的变化，形成了适合自身发展的生态位，那么这种物种就会得以延续。同样，在生态产业链网结构中的节点企业在相互合作中逐渐形成各自的相对地位和作用，生态产业链网结构的远离平衡态是各节点企业有较大的差异性，这种差异性表现在节点企业的多样性和功能上的互补性，即节点企业处于不同的生态位，节点企业的生态位越小，专业化程度越强，节点企业的数量和种类越多，链网中的节点企业的差异性就越大，为链网的稳定发展提供可能。

### 1. 生态产业链网结构的主要链接形式

生态产业链网结构主要有依托型链网、平等型链网、混合型链网和虚拟型链网四种形式<sup>[129]</sup>。

依托型生态产业链网结构的形成是以处于生态产业链网结构关键点的一家或几家大型核心企业为中心，许多中小型企业分别围绕这些核心企业进行合作，核心企业往往决定着整个网络的形成与完善，影响链网功能的发挥。由于核心企业需要大量输入原材料，这为相关节点企业提供了市场机会；同时核心企业也产生大量的副产品，如水、材料或能源等，这些廉价的副产品为相关节点企业提供了生产材料，链网的构建可以借助核心企业的潜在优势吸引相关企业加盟，且通过核心企业的主要输入输出量，确定副产品供应商或用户的搜寻范围，建立生态产业链网结构。

根据核心企业的数目不同，依托型链网可以分为：单中心依托型链网和多中心依托型链网。当链网中只存在一家核心企业时，围绕该核心企业所建立的生态产业链网结构称为单中心依托型链网；目前，单中心依托型链网在我国工业园中非常普遍，特别是一些大型企业集团，为扩大规模，围绕集团核心业务建立一系列的分厂，充分利用各种副产品和原材料，形成集团内部企业共生网络。当链网中存在两家或更多的核心企业时，由此而建立的生态产业链网结构称为多中心依托型链网。多个核心企业的生态产业链网结构中各核心企业之间也会通过原材料或产品的交换建立简单的物质交流关系，每家核心企业与其它节点企业的业务关系非常广泛，大大降低了网络内因某一环节中断而使整个网络全部瘫痪的风险，提高了整体网络的稳定性和安全性。

依托型工业链网的特点在于对核心企业具有很强的依附性，核心企业往往被视为依托型工业共生网络的缔造者，具有不可替代的作用，它决定了链网能否持续发展，核心企业主导网络的运行，在谈判与治理过程中处于绝对的主导地位。一般情况下，核心企业是特大型企业，由于核心企业对生产材料的需求量或为其它企业提供副产品的供应量基本上是丰富而稳定的，具有规模优势，因此，与之

合作的企业主要目的是为它提供生产材料或则是利用它廉价的副产品。

## 2. 卡伦堡生态工业园中的生态产业链网结构

卡伦堡生态工业园 (Kalundborg EIPs) 被认为是世界上最早建立也是目前最成功的生态产业链网结构的典型代表。卡伦堡是丹麦一个滨海小镇, 有 2 万多人口的一个工业小城市。20 世纪 70 年代, 卡伦堡几个重要的企业试图在减少费用、废物管理和更有效地使用淡水资源等方面寻求合作, 建立了企业间的合作关系。最初是围绕丹麦最大的燃煤火力发电厂 (阿斯内斯发电厂) 发展起来的, 自发的向生态工业园的方向逐渐靠近, 最终形成了蒸汽、热水、石膏、硫酸和生物技术污泥等材料的相互依存、共同利用的格局<sup>[129]</sup>。

1975 年的卡伦堡生态产业链开始建设, 参与副产品交换的企业仅有 Statoil 和 Gyproc 石膏墙板厂, 虽然 Novo Nordisk 制药公司也座落在工业园内, 但当时还没有与其它企业建立任何副产品交换关系。也就是说, 最初的生态产业链上仅仅是 Gyproc 在卡伦堡建厂, 利用 Statoil 产生的燃气 (在此之前炼油厂把燃气烧掉)。

如图 3-2 所示, 卡伦堡的第一条生态产业链:

Statoil 炼油厂 (核心企业) —— Gyproc 石膏墙板厂 (补链企业), 交换的废弃物为燃气。

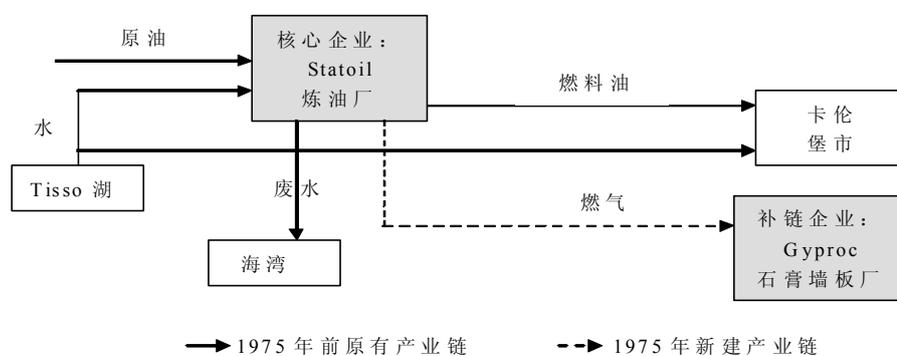


图 3-2 1975 年的卡伦堡的生态产业链中的补链企业

1979 年, 药厂和农场的副产品交换成为卡伦堡中第二条生态产业链, Novo Nordisk 国际生物技术公司每年无偿提供  $110 \times 10^4 \text{t}$  淤泥(含氮和磷)给 1000 家左右的农场, 并且丹麦政府禁止将这些物料倾倒入海, 卡伦堡的这种方式也成为最经济的办法。

3 年以后, Asnaes (丹麦最大的燃煤火力发电厂) 开始供应飞灰给 Aalborg portland 水泥公司, 这是卡伦堡生态产业链第一次有厂址不在卡伦堡工业园的公司加入合作。并出现了更多的互换项目: Asnaes 公司开始供应蒸汽给卡伦堡市、

Statiol 公司和 Novo Nordisk 公司。经过 10 年的发展，从最初的单一的生态产业链发展成真正的生态产业链网结构，Statoil 炼油厂、Asnaes 发电厂和 Novo Nordisk 制药公司，三家最大的公司都有 2 个或以上的节点企业与之发生副产品交换。

如图 3-3 所示，Asnaes 发电厂利用了海水和 Tisso 湖水，卡伦堡的新建生态产业链为：

Asnaes 发电厂（核心企业）——Aalborg portland 水泥公司（补链企业），交换的废弃物为飞灰；

Asnaes 发电厂（核心企业）——Statoil 炼油厂（核心企业），交换的废弃物为蒸汽；

Asnaes 发电厂（核心企业）——卡伦堡市（补链企业），交换的废弃物为蒸汽；

Asnaes 发电厂（核心企业）——Novo Nordisk 制药公司（核心企业），交换的废弃物为蒸汽；

Novo Nordisk 制药公司（核心企业）——约 1000 家农场（补链企业企业），交换的废弃物为淤泥。

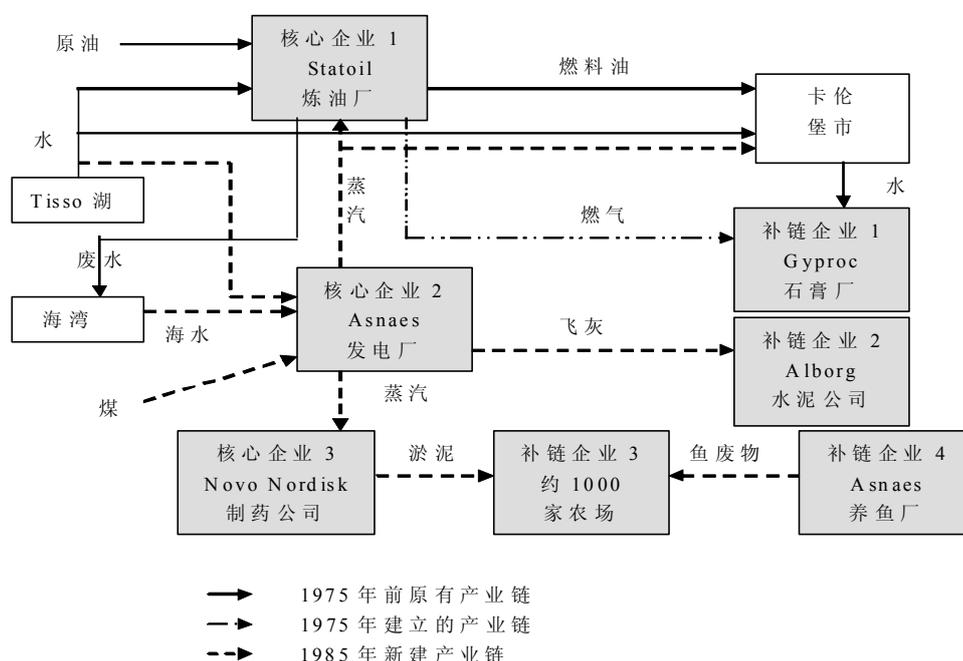


图 3-3 1985 年的卡伦堡的生态产业链网结构中的补链企业

在 1985 到 1995 年间，卡伦堡生态产业链网结构又有进一步发展。又有大量的企业参与到了该链网中，副产品交换关系更加丰富，如图 3-4 所示，卡伦堡的新建生态产业链为：

Statoil 炼油厂（核心企业）——Kemira 硫酸公司（补链企业），交换的废弃物为硫磺；

Statoil 炼油厂（核心企业）——Asnaes 发电厂（核心企业），交换的废弃物为废水、锅炉用水、燃气；

Asnaes 发电厂（核心企业）——Gyproc 石膏墙板厂（补链企业），交换的废弃物为石膏；

Asnaes 发电厂（核心企业）——Novo Nordisk 制药公司（核心企业），交换的废弃物为燃气；

Asnaes 发电厂（核心企业）——Asnaes 养鱼厂（核心企业），交换的废弃物为热海水；

Tisso 湖——Novo Nordisk 制药公司（核心企业），交换的废弃物为湖水。

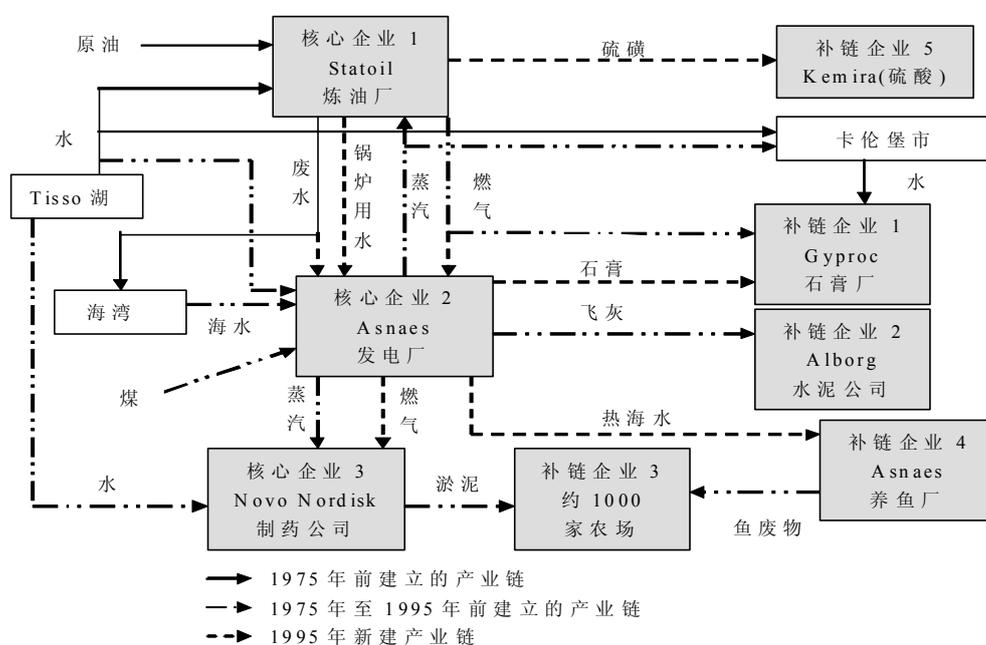


图 3-4 1995 年的卡伦堡生态产业链网结构中的补链企业

截止到 2000 年，卡伦堡工业园已有 Asnaes 发电厂、Statoil 炼油厂、Gyproc 石膏墙板厂、Novo Nordisk 制药公司、A / S Bioteknisk Jordrens 土壤修复公司（1999 年加入）和卡伦堡市区 6 家大型企业和上百家小型企业，它们通过副产品、废弃物、资金和信息等纽带联系在一起，在减少资源消耗、减少环境污染、废料的再利用等方面，形成了一个具有完善的副产品交换网的生态产业链网结构，卡伦堡的环境效益、经济效益也得到了社会的公认。

### 3. 贵港（制糖）生态工业园中的生态产业链网结构

广西贵港国家生态工业（制糖）园既是我国第一个国家生态工业示范园区，

也是国内规模最大,经济效益最好的甘蔗制糖企业。制糖业本身排污多、污染重,特别是在我国这种制糖技术比较落后的国家,制糖企业造成的污染和浪费一直是该行业难以克服的一个大问题。为了解决这一问题,变废为宝。2000年6月,国家环保总局有关人士在贵港调研时,提出了以贵糖集团为龙头建立生态工业园的设想,当地政府积极响应。2001年8月,国家环保总局批准建设我国第一个生态工业园--贵港生态工业园,如图3-5所示<sup>[89]</sup>。贵糖集团围绕排污多、污染重的制糖厂建立了酿酒厂、纸浆厂、造纸厂、化肥厂、水泥厂、发电厂以及大量蔗田等补链企业,形成了众多的生态产业链来循环利用这些废物从而减少污染并从中获益。

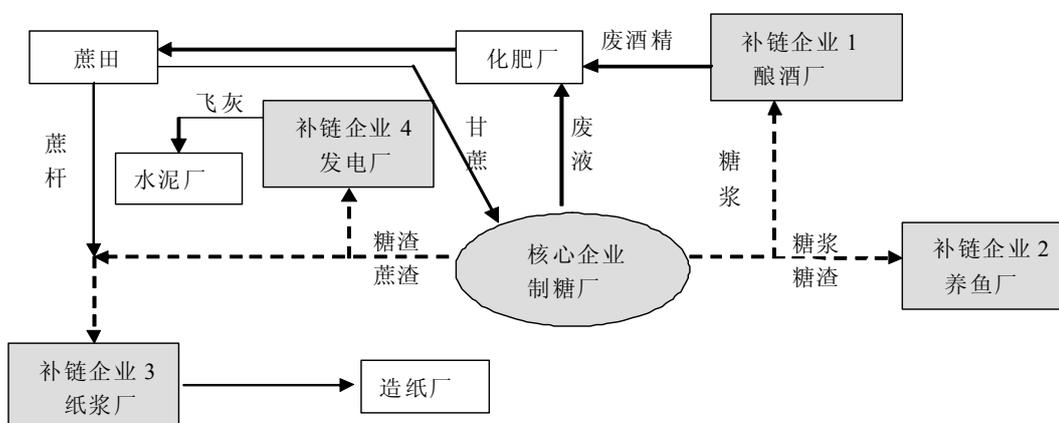


图 3-5 广西贵糖集团的生态产业链网结构中的补链企业

在贵港生态产业链网结构中,核心企业是制糖厂,针对糖浆和糖渣建立了生态产业链:制糖厂—酿酒厂—化肥厂—蔗田和制糖厂—养鱼厂;针对蔗渣和糖渣建立了生态产业链:制糖厂—纸浆厂—造纸厂和制糖厂—发电厂—水泥厂;其中蔗田负责生产提供高产、安全、稳定的甘蔗,保证园区制造系统充足的原料供应;核心企业制糖厂通过制糖新工艺改造、低聚果糖技术改革生产出普通精炼糖以及高附加值的有机糖、低聚果糖等产品;补链企业酿酒厂通过能源酒精过程和酵母精工程,有效利用甘蔗制糖副产品—废糖浆,生产出能源酒精和高附加值的酵母精等产品;补链企业纸浆厂和造纸厂利用甘蔗制糖的副产品:蔗渣,生产出高质量的生活用纸和高附加值 CMC 等产品;补链企业发电厂利用甘蔗制糖的副产品—蔗渣替代部分燃料煤,为链网供应生产所必需的电力和蒸汽,保障整个生产系统的动力供应。

通过各生态产业链的输入和输出相互衔接,做到资源的最佳配置和废物的有效利用,环境污染减少到最低水平,形成了一个比较完整的工业和种植业相结合的生态系统,以及高效、安全、稳定的制糖生态产业链网结构。

## 3.2 生态产业链网结构中补链企业选择的主要因素

### 3.2.1 补链企业与核心企业的关系

核心企业是指在生态产业链网结构中，它们使用和传输的物质最多，能量流动的规模最大，带动和牵制着其他企业、产业的发展，居于中心地位，是生态产业链的“链核”，对生态产业链网结构的形成起着关键作用。核心企业的存在对于维持生态产业链网结构的组成和多样性具有决定性作用，因此它对于链网中的其他节点企业相对是非常重要的。

前面提到的国内外典型的案例，卡伦堡生态工业园的 Asnaes 火力发电厂、广西贵港生态工业园的制糖厂产生的工业剩余物质和副产品多，能耗高，都属于核心企业。这些核心企业是产业结构的核心和结构进化的主角，能带动和牵制其它企业、行业的发展，因此核心企业作为生态产业链网结构的链核，是发展链网的关键。

通常核心企业具有以下两个特点<sup>[128]</sup>：一是核心企业的产品需求和市场潜力巨大，体现了生态产业链网结构一定时期的经济发展方向；二是核心企业能充分发挥生态产业链网结构的比较优势，如科技含量高、技术进步快、技术要素密集、创造高效率和高附加值等，使区域经济得到快速、持续、稳定发展。

核心企业是链网内物质流、能量流和信息流的核心和重心，它的发展和壮大对整个链网的稳定发展具有极其重要的作用。因此生态产业链网结构要发展，首先要抓准核心企业的发展，核心企业是链网的支柱产业，其产值高，发展速度快，对链网的可持续发展起着极其重要的作用；其次，主导性和多样性的合理匹配是实现链网可持续发展的基本前提。根据链网发展的需要，充分考虑生态产业链的长短和产业关联度的高低，因地制宜、优选突出地区产业优势或反映园区规划主题的企业，及时引进补链企业，以促进节点企业之间的不平衡发展，在整个链网内形成相互渗透、相互融合、相互协作、相互促进的格局。

### 3.2.2 生态产业多样性是引入补链企业的主要依据

1955年，MacArthur<sup>[136]</sup>在研究群落学时，发现某些群落的物种相对保持稳定，并称为稳定的群落；而另外一些群落中则表现出很大的变化。称为不稳定的群落。并把这种稳定性归结为两个方面的因素：物种的多少和物种之间相互作用的大小。

群落多样性有助于生态系统稳定性。同理,生态产业多样性有助于提高生态产业链网结构的良性发展。这里产业多样性包括节点企业的多样性,产品的种类、结构的多样性,物质流、能量流和信息流的多样性等。

卡伦堡生态产业链网结构由起初的核心企业单向输出,逐步演化为核心企业与补链企业之间的双向输出,形成相互的物质交换模式,生态产业链数量在逐渐增加,链接关系日趋完整和复杂,链网内的资源效率、生态效率和经济效率显著提高。

生态产业链网结构需要核心企业的实力支撑,同时也需要补链企业多元化的结构和多样化的产品,核心企业与补链企业之间的协调与配套才能分散系统风险,增强稳定性。

补链企业作为生态产业链网结构的一个重要关节点,其作用在于一旦产业链某一环节断裂,通过引入补链企业就可以迅速替补。可见,如果离开补链企业的扶持与合作,核心企业就不可能顺利发展。核心企业与补链企业协同发展,既有利于充分利用区域资源,也有利于提高生态产业链网结构的抗风险能力。因此,核心企业与补链企业相连,有利于核心企业进一步“内化”,节点企业之间的交易成本降低,满足核心企业扩张的预期要求。补链企业对于生态产业链网结构的发展壮大起着承上启下的作用,对维护链网产业多样性和整个链网稳定性具有重要意义。

### 3.2.3 评价指标体系的构建

在设置评价指标体系时,除了要符合统计学的基本规范外,必须遵循以下原则:

1. 科学性原则。要科学地建立指标体系,首先需要明确指标概念,指标概念有一定的科学内涵,能够度量和反映所研究问题的现状以及发展趋势。
2. 完备性原则。作为一个整体,指标体系应该尽可能全面地反映和测度被评价对象的主要特征和基本状况。
3. 针对性原则。在设置和筛选指标时,针对研究领域的共性和难度问题建立指标体系。
4. 独立性原则。在选择指标时,要注意选择统计意义上不相关的指标,以避免信息的重叠,以提高评价的准确性。
5. 可操作性原则。设计具有可测性和可比性的指标,且利用实际调查的相关统计资料易于量化。也就是说,通过统计调查,运用整理、抽样等手段可以获得指标数据。

指标体系是由一组相互关联、具有层次结构的功能集组成的,功能集指标的

选择,决定了生态产业链网结构中补链企业评价指标体系的结构框架,是指标体系是否合理有效的关键。要建立全面又简练的功能集指标,不仅要生态产业链网结构本身的结构、功能、特点有透彻的了解,这是确定评价指标的基础;而且要对补链企业的发展目标有清晰的理解,这是选择评价功能集的基础。

本文采用频度统计法、理论分析法和专家咨询法,以满足指标选择的基本原则。

频度统计法主要是对目前有关合作企业评价研究的报告、论文进行频度统计,选择那些使用频度较高的指标;理论分析法主要是对生态产业链网结构发展的内涵、特征、基本要素等主要问题进行分析、比较、综合,选择那些重要的发展条件和针对性强的指标;专家咨询法是在初步提出评价指标的基础上,进一步征询专家意见,对指标进行调整。

运用这三种方法,最终得到补链企业评价的一般指标体系。建立了一般评价指标体系的层次结构如表 3-1 所示。

表 3-1 补链企业的综合评价指标体系

评价内容	评价指标	备注	取值范围*
A <sub>1</sub> 经济发展指标	B <sub>1</sub> 人均总产值(万元/人)	定量	-
	B <sub>2</sub> 总产值年平均增长率(%)	定量	>9
	B <sub>3</sub> 原材料成本的降低(%)	定量	-
	B <sub>4</sub> 废弃物、副产品处理成本占总成本比例(%)	定量	-
	B <sub>5</sub> 物流成本降低率(%)	定量	-
	B <sub>6</sub> 基建成本降低率(%)	定量	>30
	B <sub>7</sub> 能源消耗(千兆焦耳/万元)	定量	<14.7
	B <sub>8</sub> 原材料消耗(吨/万元)	定量	<7
	B <sub>9</sub> 水消耗(立方米/万元)	定量	<9
A <sub>2</sub> 环境指标	B <sub>10</sub> 空气污染指数%	定量	<45
	B <sub>11</sub> 区域环境噪声平均值(dB)	定量	<53
	B <sub>12</sub> 水功能区水质达标率%	定量	100
	B <sub>13</sub> 工业废水处理达标率%	定量	100
	B <sub>14</sub> 工业废气处理达标率%	定量	100
	B <sub>15</sub> 工业固废处理达标率%	定量	100
	B <sub>16</sub> 废水减排率%	定量	>40
	B <sub>17</sub> 废气减排率%	定量	>20

	B <sub>18</sub> 固体废弃物减排率%	定量	>30
	B <sub>19</sub> 资源消耗下降比率%	定量	-
	B <sub>20</sub> 垃圾分类回收利用率%	定量	>80
	B <sub>21</sub> 清洁能源所占比例%	定量	-
	B <sub>22</sub> 环保投资总投资比例%	定量	>3
A <sub>3</sub> 成长能力指标	B <sub>23</sub> 工业废弃物综合利用率%	定量	>70
	B <sub>24</sub> 水资源的重复利用率%	定量	>80
	B <sub>25</sub> 原材料的重复利用率%	定量	>80
	B <sub>26</sub> 能源的重复利用率%	定量	>70
	B <sub>27</sub> 原材料的可替代性	定性	可替代
	B <sub>28</sub> 内部管理制度	定性	完备
	B <sub>29</sub> 资源产出率%	定量	>60
	B <sub>30</sub> 合作创新程度	定性	-
	B <sub>31</sub> 科研项目成果年增长率%	定量	-
	B <sub>32</sub> 高新技术占总产值比重%	定量	>40%

注：\*“取值范围”数据说明：

参考众多文献中提供的自然环境特点、行业特点和社会经济发展状况以及国家的三废排放标准等数据，确定各指标的最佳取值。在具体应用时，可根据实际情况适当调整合格数据的范围。

“-”表示根据实际情况确定取值情况。

### 3.3 生态产业链网结构中选择补链企业评价模型的构建

#### 3.3.1 可拓学与优度评价法

##### 1. 可拓学

在人类社会的发展过程中，矛盾问题比比皆是，在诸多领域中，无论是管理、控制、计算机技术、人工智能、机械、电工等，都会碰到各种各样的矛盾问题，那么，解决矛盾问题有无规律可循？有无理论可依？能否建立一套理论与方法，去探讨它们，这就是可拓学研究的出发点。

矛盾问题是可拓学的研究对象。我们把矛盾问题分为三类：

第一类是主观和客观相矛盾的问题，例如用只能称 20kg 的秤去称重量达数

吨的大象的曹冲称象问题，又称为不相容问题。

第二类是主观和主观相矛盾的问题，是指在同一条件下要实现两个或两个以上不能同时实现的目标问题。例如，在一个笼子里同时放一只狼和一只羊，设计重量轻有保暖的衣服等等，又称为对立问题。

第三类是自然界存在的客观矛盾问题。是指客观事物的矛盾构成的问题。例如植物要在沙漠里生长的问题。

可拓学主要研究第一类和第二类矛盾问题，利用种种变换方法，研究解决矛盾问题的理论与方法，使不相容转化为相容，对立转化为共存。在研究方法上，它与社会科学研究矛盾问题的角度不同，可拓学使用形式化的模型，运用可拓变换和可拓推理等方法来解决矛盾问题。

## 2. 优度评价方法及其优点

可拓学的优度评价方法是由我国学者蔡文等人 1983 年创立的解决矛盾问题的新型工程理论方法。它通过建立多指标性能参数的综合评判物元模型来描述矛盾问题，并建立分段或离散关联函数，对物质变和量变过程进行定量描述，以定量的数值表示评定结果，从而能较完整地反映被评价对象的综合水平。

在处理实际问题的过程中，有些条件是非满足不可的，也就是说，该条件不能达到，其他任何条件再好也不能使用。如很多产品的安全性能是非满足不可的条件，凡是达不到安全要求的一切材料、设备和方案都是不可用的。

因此，对于一个问题的评价也不能仅仅考虑有利的一面，还需要考虑不利的一面，例如某个企业生产的产品，盈利率很高，但是它的排放物对环境的污染却很严重；而另外一种产品相对而言，盈利率较低，但是对环境是没有危害的。在进行这类评价时，必须考虑利弊两个方面，进行综合评价，最后才能得到合适的方案。因此，优度评价法有如下的两个特点：

- 一是用描述非满足不可的条件；
- 二是关联函数的值可正可负，由此来反映一个对象的利弊程度。

## 3.3.2 评价方法的建立

### 1. 权重确定方法

综合评价指标体系中各指标权重的确定是否合理，往往直接关系到评价的质量，影响到最终决策，因而是综合评价的核心工作之一。目前国内确定权重的方法可分为三大类：主观赋权法、客观赋权法和主客观权重组合法。

#### 1) 主观赋权法

主观赋权法主要是由专家根据经验主观判断而得到，这种方法人们研究较早，也较为成熟。但由于权系数往往是由人来确定的；因此，常常带有主观随意性，影响到解的评价的真实性和可靠性，客观性较差。如层次分析法（AHP）和专家打分法。

①美国运筹学家 A.L.saaty 于 20 世纪 70 年代提出的层次分析法，是对方案的多指标系统进行分析的一种层次化、结构化决策方法，它将决策者对复杂系统的决策思维过程模型化、数量化。应用这种方法，决策者通过将复杂问题分解为若干层次和若干因素，在各因素之间进行简单的比较和计算，就可以得出不同方案的权重，为最佳方案的选择提供依据。大体可分为以下三个步骤：

步骤 1：分析系统中各因素间的关系，对同一层次各元素关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较，构造两两比较的判断矩阵；

步骤 2：由判断矩阵计算被比较元素对于该准则的相对权重，并进行判断矩阵的一致性检验；

步骤 3：计算各层次对于系统的总排序权重，并进行排序。最后，得到各方案对于总目标的总排序。

层次分析法的特点是在对复杂的决策问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分析的基础上，利用较少的定量信息使决策的思维过程数学化，从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的决策方法。尤其适合于对决策结果难于直接准确计量的场合。但是由于 AHP 方法在构造判断矩阵时受单个专家主观偏好影响较大，往往出现所得到的排序结果与客观实际偏差较大等缺陷。

## ②专家打分法

专家打分法是指通过匿名方式征询有关专家的意见，对专家意见进行统计、处理、分析和归纳，客观地综合多数专家经验与主观判断，对大量难以采用技术方法进行定量分析的因素做出合理估算，经过多轮意见征询、反馈和调整，对债权价值和价值可实现程度进行分析的方法。专家打分法适用于存在诸多不确定因素、采用其他方法难以进行定量分析的情况。专家打分法的程序主要包括选择专家、以匿名方式征询专家意见、专家根据反馈结果修正自己的意见、形成最终分析结论。

## 2) 客观赋权法

客观赋权法的原始数据是由各指标在评价中的实际数据组成，它不依赖于人的主观判断，因而此类方法客观性较强，缺点在于对指标的具体经济意义重视不够，会存在一定的误差。如变异系数法和熵权法。

①变异系数法,将指标实测值和标准差或标准差平均数的比值经过一定定量比较后获得权重。当由于评价指标对于评价目标而言比较模糊时,采用变异系数法评价进行评定是比较合适的,适用各个构成要素内部指标权数的确定。

②熵权法,熵原本是热力学概念,后由申农(C. E. Shannon)引入信息论,表示一个系统无序程度的度量,可以度量数据多提供的有效信息量。因此根据各指标值计算得到的熵权可以来确定各指标的权重。

考虑一个评价问题,设有  $m$  个评价指标、 $n$  个被评价对象,得到最初评价信息矩阵  $R$  [139, 140]:

$$R = \begin{bmatrix} r'_{11} & r'_{12} & \cdots & r'_{1n} \\ r'_{21} & r'_{22} & \cdots & r'_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r'_{m1} & r'_{m2} & \cdots & r'_{mn} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

对  $R$  做归一化处理得到:  $R = (r_{ij})_{m \times n}$

$r_{ij}$  为第  $j$  个评价对象在指标上的值,且:

$$r'_{ij} = \frac{r'_{ij} - \min_j \{r'_{ij}\}}{\max_j \{r'_{ij}\} - \min_j \{r'_{ij}\}}, \quad r_{ij} \in [0, 1] \quad (3-2)$$

式中,  $\max, \min$  分别为同指标下不同事物中最满意或最不满意者(越小越不满意或越大越不满意)。

则第  $i$  个评价指标的熵定义为:

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, \quad \text{式中, } f_{ij} = \frac{1+r_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1+r_{ij})} \quad (3-3)$$

第  $i$  个评价指标的熵权定义为:

$$W_i = \frac{1-H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i}, \quad (0 \leq W_i \leq 1, \sum_{i=1}^m W_i = 1) \quad (3-4)$$

从信息角度考虑,熵权代表该指标在该问题中提供有用信息量的多寡程度。当各评价对象在指标  $i$  上的值完全相同时,熵值达到最大值 1,熵权为 0,说明该指标未提供任何有用的信息。反之,各评价对象在指标  $i$  上的值中相差较大、熵值较小、熵权较大时,即各评价对象的差异性较大,说明该指标提供了有用的信息;也就是说,熵权反映的是在给定被评价对象集后各种评价指标值确定的情况下,各指标在竞争意义上的相对激烈程度。

通常,当评价对象确定以后,要根据熵权对评价指标进行调整、增减。以便于做出更精确、可靠的评价;同时也可以利用熵权对某些指标评价值的精度进行调整。

### 3) 权重组合法

组合赋权法是结合了主观赋权法和客观赋权法的各自特点,首先分别在主观赋权法和客观赋权法内部找出最合理的主、客观权重系数,再根据具体情况确定主、客观赋权法权重系数所占的比例,最后求出综合评价的权重系数,这种方法在一定程度上即反映了决策者的主观信息,又可以利用原始数据和数学模型,使权重系数具有客观性。

由于生态产业链网结构中影响补链企业的因素很多,为了避免上述两种赋权方法的缺陷,本文在确定权重中将采用一种较为理想的方法:主观赋权和客观赋权相结合的方法。

## 2. 优度评价模型的构建

针对传统评价方法各自的优缺点,在认真研究可拓学基本原理和理论方法的基础上,创新性地采用一种全新的评价方法:可拓学优度评价法。优度评价方法通过处理指标与目标间相互关系问题,得出某一指标相对于评价目标的合格率,它使指标与指标间相互独立。这一特点使得优度评价方法具有广泛的应用领域。优度评价方法适用于任何的评价体系,对评价体系没有要求和限制,它既适合定性指标也能应用于定量指标,与指标的单位没有关系,它解决了指标与方法间的不相容问题。许多传统评价方法都是对指标有量化要求,而不能解决纯粹的定性问题。而优度评价方法通过建立合适的关联函数解决定性指标的问题。

一般情况下,优度评价方法具体应用步骤<sup>[139-141]</sup>如下:

第一步,确定衡量条件。要评价一个对象的优劣,首先必须根据实际情况,制定出符合技术、经济、社会要求的评价标准,确定出衡量条件集,设为  $M=\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ , 其中  $M_i=(c_i, V_i)$  是特征元,  $c_i$  为评价指标,  $V_i$  是数量化的量值域 ( $i=1, 2, \dots, m$ )。

第二步,确定权重系数。评价一个对象  $N_j(j=1, 2, \dots, n)$  的优劣的各衡量条件  $M_i$  有轻重之分,对于非满足不可的条件,用指数  $\Lambda$  表示,对于其它衡量条件,权系数的大小对于优度的高低具有举足轻重的作用,不同的权系数会得出不同的结论。为了尽量合理的确定权系数,本章采用组合权重方法来表示各衡量条件的重要程度。

第  $i$  个衡量条件的熵权(客观权重)为式(3-4):

$$W_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i}, \quad (0 \leq W_i \leq 1, \sum_{i=1}^m W_i = 1)。$$

熵权的确定取决于待选方案的固有信息，且同一评价指标在不同的项目方案上由于指标观测值差异程度不同可能具有不同的客观权重，因此为了全面反映评价指标的重要性，需要充分考虑专家和决策者的经验及判断，本文采用专家打分法  $\theta_i$  与熵权  $w_i$  相结合的方法，确定出各指标的权重：

$$\alpha_i = \frac{\theta_i W_i}{\sum_{i=1}^n \theta_i W_i}, \quad \text{并有：} 0 \leq \alpha_i \leq 1, \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1。 \quad (3-5)$$

记为： $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ ，若  $\alpha_{i0} = \Lambda$ ，则  $\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i0}}^m \alpha_k = 1。$  (3-6)

第三步，首次评价。对非满足不可的条件进行筛选，除去不满足该条件的对象，然后对已符合非满足不可的条件对象进行第四步。

第四步，建立关联函数，计算合格度。可拓集合用取自  $(-\infty, +\infty)$  的实数表示事物具有某种性质的程度，正数表示具有该性质的程度，负数表示不具有该性质的程度，零表示既有该性质又不具有该性质。在解决实际问题时，通常用关联函数来描述事物关于某些量值符合要求的程度。

对衡量条件集  $M_i = (c_i, V_i)$  建立关于  $V_1, V_2, \dots, V_m$  的关联函数。关联函数作为定量化描述事物量变和质变的工具，可以定量描述任一元素属于经典域  $X_0$  的程度。把对象  $N_j$  关于各衡量条件  $M_i$  的关联函数值记为  $K_i(N_j)$ ，则各个对象关于  $M_j$  的合格度为：

$$K_i = (K_i(N_1), K_i(N_2), \dots, K_i(N_n))。 \quad (3-7)$$

第五步，规范化。为了便于对解的优劣程度进行比较，首先要把合格度进行规范化，规范化的目的在于将不同领域或具有不同单位的不同因素进行无量纲化处理。

$$K_{ij} = \begin{cases} \frac{K_i(N_j)}{\max_{x \in X_0} K_i(x)}, & K_i(N_j) > 0 \\ \frac{K_i(N_j)}{\max_{x \in X_0} |K_i(x)|}, & K_i(N_j) < 0 \end{cases}, \quad (X_0 \text{ 为经典域}) \quad (3-8)$$

则各对象关于  $M_i$  的规范合格度为：

$$k = (k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{in})。 \quad (3-9)$$

第六步，计算优度。优度就是在上述五个步骤处理后，经过定量化得到的各

个方案优劣的一个量化值。对象  $N_j$  关于衡量条件  $M_i$  的规范合格度为：

$$K(N_j) = (K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{mj})^T \quad (3-10)$$

优度为：

$$C(N_j) = \alpha K(N_j) = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) (K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{mj})^T = \sum_{i=1}^m \alpha_i k_{ij} \quad (3-11)$$

一般地，当  $C > 0$  时，表示问题的解“得多于失”；当  $C < 0$  时，表示问题的解“失多于得”。对  $N_j$  的优度进行比较：若  $C(N_0) = \max_{j \in \Omega} \{C(N_j)\}$ ，则对象  $N_0$  为最优。

### 3.3.3 应用算例

假设针对核心企业目前排放的废弃物为 45 万吨，有 5 个候选的补链企业。企业  $x_1$  需要该废弃物 10 万吨，为冶金类企业生产辅料；补链企业  $x_2$  需要该废弃物 5 万吨，作为生产建材产品 A 的主要原料；补链补链企业  $x_3$  需要该废弃物 5 万吨，作为生产建材产品 B 的主要原料；补链企业  $x_4$  需要该废弃物 12 万吨，作为生产冶金产品的直接添加剂；补链企业  $x_5$  需要该废弃物 25 万吨，作为生产建材产品 C 的主要原料。其具体的指标值如表 3-2 所示。

表 3-2 候选补链企业的指标值

评价指标		补链企业	补链企	补链企	补链企	补链企	补链企
		业 $X_1$	业 $X_2$	业 $X_3$	业 $X_4$	业 $X_5$	
A <sub>1</sub> 经济 发展 指 标	B <sub>1</sub> 人均总产值 (万元/人)	32	35	30	40	33	
	B <sub>2</sub> 总产值年平均增长率 (%)	5	7	3	9	6	
	B <sub>3</sub> 原材料成本的降低 (%)	3	2	3	2	4	
	B <sub>4</sub> 废弃物、副产品处理成本占总成本比例 (%)	20	22	30	24	25	
	B <sub>5</sub> 物流成本降低率 (%)	25	20	23	23	27	
	B <sub>6</sub> 基建成本降低率 (%)	31	26	32	28	30	
	B <sub>7</sub> 能源消耗 (千兆焦耳/万元)	14.7	15	14	17.5	15	
	B <sub>8</sub> 原材料消耗 (吨/万元)	7	7	6	9	6	
	B <sub>9</sub> 水消耗 (立方米/万元)	9	8	9	11	8	
A <sub>2</sub>	B <sub>10</sub> 空气污染指数%	45	43	49	52	46	
	B <sub>11</sub> 区域环境噪声平均值 (dB)	53	50	52	58	51	
	B <sub>12</sub> 水功能区水质达标率%	99	95	98	97	95	
	B <sub>13</sub> 工业废水处理达标率%	98	97	95	99	96	
	B <sub>14</sub> 工业废气处理达标率%	97	96	97	96	97	

环境指标	B <sub>15</sub> 工业固废处理达标率%	97	99	98	96	98
	B <sub>16</sub> 废水减排率%	45	42	50	40	45
	B <sub>17</sub> 废气减排率%	25	25	30	22	30
	B <sub>18</sub> 固体废弃物减排率%	35	32	30	30	35
	B <sub>19</sub> 资源消耗下降比率%	10	9	12	10	13
	B <sub>20</sub> 垃圾分类回收利用率%	80	78	80	77	82
	B <sub>21</sub> 清洁能源所占比例%	30	39	35	32	34
A <sub>3</sub> 成长能力指标	B <sub>22</sub> 环保投资占总投资比例%	3	5	2	2	3
	B <sub>23</sub> 工业废弃物综合利用率%	70	66	70	68	70
	B <sub>24</sub> 水资源的重复利用率%	80	76	80	77	81
	B <sub>25</sub> 原材料的重复利用率%	80	80	82	76	80
	B <sub>26</sub> 能源的重复利用率%	71	71	75	68	71
	B <sub>27</sub> 原材料的可替代性	B	C	B	A	B
	B <sub>28</sub> 内部管理制度	A	B	C	A	B
	B <sub>29</sub> 资源产出率%	60	62	60	57	60
	B <sub>30</sub> 合作创新程度	A	B	B	A	B
	B <sub>31</sub> 科研项目成果年增长率%	10	10	9	12	7
B <sub>32</sub> 高新技术占总产值比重%	40	38	43	40	38	

注：

B<sub>27</sub>的取值含义为：A（100%）为完全替代、B（75%）和C（50%）部分替代、D（10%）基本不能替代；

B<sub>28</sub>的取值含义为：A（100%）为内部管理制度完全完备、B（75%）和C（50%）部分完备、D（10%）基本不完备；

B<sub>30</sub>的取值含义为：A（100%）为合作创新程度高、B（75%）和C（50%）合作创新程度低、D（10%）基本无合作创新。

第一步，确定衡量条件。衡量条件集为： $M_i = (c_i, V_i)$ ， $c_i$ 为表3-2中的评价指标 $B_i$ ， $V_i$ 是数量化的量值域（ $i=1, 2, \dots, 32$ ）。根据实际情况，确定 $V_i$ 取值范围，如表3-3所示。

表 3-3  $V_i$ 的取值范围

衡量条件		取值范围
A <sub>1</sub>	V <sub>1</sub> 人均总产值（万元/人）	≥30
	V <sub>2</sub> 总产值年平均增长率（%）	≥5%
	V <sub>3</sub> 原材料成本的降低（%）	≥2%

经济 发 展 指 标	V <sub>4</sub> 废弃物、副产品处理成本占总成本比例 (%)	≥20%
	V <sub>5</sub> 物流成本降低率 (%)	≥20%
	V <sub>6</sub> 基建成本降低率 (%)	≥25%
	V <sub>7</sub> 能源消耗 (千兆焦耳/万元)	≤18
	V <sub>8</sub> 原材料消耗 (吨/万元)	≤10
	V <sub>9</sub> 水消耗 (立方米/万元)	≤12
A <sub>2</sub> 环 境 指 标	V <sub>10</sub> 空气污染指数%	≤50%
	V <sub>11</sub> 区域环境噪声平均值 (dB)	≤55
	V <sub>12</sub> 水功能区水质达标率%	≥95%
	V <sub>13</sub> 工业废水处理达标率%	≥95%
	V <sub>14</sub> 工业废气处理达标率%	≥95%
	V <sub>15</sub> 工业固废处理达标率%	≥95%
	V <sub>16</sub> 废水减排率%	≥40%
	V <sub>17</sub> 废气减排率%	≥25%
	V <sub>18</sub> 固体废弃物减排率%	≥30%
	V <sub>19</sub> 资源消耗下降比率%	≥8%
	V <sub>20</sub> 垃圾分类回收利用率%	≥75%
	V <sub>21</sub> 清洁能源所占比例%	≥30%
V <sub>22</sub> 环保投资总投资比例%	≥2%	
A <sub>3</sub> 成 长 能 力 指 标	V <sub>23</sub> 工业废弃物综合利用率%	100%至 85%为最好; 85%至 65%为合格; 65%以下不合格
	V <sub>24</sub> 水资源的重复利用率%	100%至 85%为最好; 85%至 75%为合格; 75%以下不合格
	V <sub>25</sub> 原材料的重复利用率%	100%至 85%为最好; 85%至 75%为合格; 75%以下不合格
	V <sub>26</sub> 能源的重复利用率%	100%至 85%为最好; 85%至 70%为合格; 70%以下不合格
	V <sub>27</sub> 原材料的可替代性	A (100%) 为完全替代; B (75%) 和 C (50%) 部分替代; D (10%) 基本不能替代
	V <sub>28</sub> 内部管理制度	A (100%) 为内部管理制度完全完备; B (75%) 和 C (50%) 部分完备; D (10%) 基本不完备
	V <sub>29</sub> 资源产出率%	≥60%

$V_{30}$ 合作创新程度	A(100%)为合作创新程度高; B(75%)和 C(50%)合作创新程度低; D(10%)基本无合作创新
$V_{31}$ 科研项目成果年增长率%	$\geq 8\%$
$V_{32}$ 高新技术占总产值比重%	$\geq 38\%$

第二步, 确定权重系数。根据实际情况和专家的分析讨论, 认为  $V_1$ 、 $V_4$ 、 $V_{19}$  和  $V_{32}$  是非满足不可的指标, 权系数记为  $\Lambda$ 。得到最初熵权的评价信息矩阵(式(3-1)), 并做归一化处理, 得出其余评价指标的熵权  $W$ , 如表 3-4 所示:

表 3-4 评价指标的熵权

$W_2$	$W_3$	$W_5$	$W_6$	$W_7$	$W_8$
0.03560567	0.03625639	0.03534084	0.03520923	0.03652542	0.03667643
$W_9$	$W_{10}$	$W_{11}$	$W_{12}$	$W_{13}$	$W_{14}$
0.03667643	0.03596072	0.03655819	0.03595636	0.03561589	0.03508769
$W_{15}$	$W_{16}$	$W_{17}$	$W_{18}$	$W_{20}$	$W_{21}$
0.03540379	0.03598210	0.03532658	0.03579701	0.03573801	0.03581627
$W_{22}$	$W_{23}$	$W_{24}$	$W_{25}$	$W_{26}$	$W_{27}$
0.03626453	0.03442883	0.03526594	0.03499189	0.03586440	0.03559753
$W_{28}$	$W_{29}$	$W_{30}$	$W_{31}$		
0.03501318	0.03523138	0.03633090	0.03547841		

由 dephi 法给出的各指标主观权重  $\theta_j$ , 如表 3-5 所示:

表 3-5 评价指标的主观权重

$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$
0.033	0.03	0.043	0.041	0.036	0.041
$\theta_9$	$\theta_{10}$	$\theta_{11}$	$\theta_{12}$	$\theta_{13}$	$\theta_{14}$
0.036	0.038	0.034	0.042	0.035	0.033
$\theta_{15}$	$\theta_{16}$	$\theta_{17}$	$\theta_{18}$	$\theta_{20}$	$\theta_{21}$
0.035	0.035	0.037	0.044	0.042	0.035
$\theta_{22}$	$\theta_{23}$	$\theta_{24}$	$\theta_{25}$	$\theta_{26}$	$\theta_{27}$
0.029	0.030	0.039	0.026	0.038	0.034
$\theta_{28}$	$\theta_{29}$	$\theta_{30}$	$\theta_{31}$		
0.038	0.031	0.033	0.032		

与 W 相结合，最终确定出各指标的权重  $\alpha$ ，如表 3-6 所示：

表 3-6 评价指标的组合权重

$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$
$\Lambda$	0.03289069	0.03044708	$\Lambda$	0.04253879	0.04040920	0.03680761
$\alpha_8$	$\alpha_9$	$\alpha_{10}$	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{14}$
0.04209309	0.03695978	0.03825180	0.03479393	0.04227317	0.03489408	0.03241221
$\alpha_{15}$	$\alpha_{16}$	$\alpha_{17}$	$\alpha_{18}$	$\alpha_{19}$	$\alpha_{20}$	$\alpha_{21}$
0.03468627	0.03525287	0.03658839	0.04408993	$\Lambda$	0.04201646	0.03509040
$\alpha_{22}$	$\alpha_{23}$	$\alpha_{24}$	$\alpha_{25}$	$\alpha_{26}$	$\alpha_{27}$	$\alpha_{28}$
0.02943879	0.02891236	0.03849993	0.02546716	0.03814935	0.03387963	0.03724389
$\alpha_{29}$	$\alpha_{30}$	$\alpha_{31}$	$\alpha_{32}$			
0.03057252	0.03356062	0.03178001	$\Lambda$			

第三步，首次评价。利用  $V_1$ 、 $V_4$ 、 $V_{19}$  和  $V_{32}$ ，对 5 个企业首次评价，不满足条件者为不可取企业，显然没有不可取企业。则衡量条件集变为  $V'$ （共 28 个指标值，不包括  $V_1$ 、 $V_4$ 、 $V_{19}$  和  $V_{32}$ ），权系数向量变为  $\alpha'$ （共 28 个权重，不包括  $\alpha_1$ 、 $\alpha_4$ 、 $\alpha_{19}$  和  $\alpha_{32}$ ）。

第四步，建立关联函数，并计算合格度。按照各类指标的特点，分别建立关于表 3-7 中  $V_i$  的关联函数：

$$K_2(x) = \begin{cases} x-0.09, & x > 0.09 \\ 0.09-x-1, & 0 < x \leq 0.09 \end{cases} \quad K_3(x) = \begin{cases} x-0.02, & x > 0.02 \\ 0.02-x-1, & 0 < x \leq 0.02 \end{cases}$$

$$K_5(x) = \begin{cases} x-0.2, & 0 < x \leq 0.2 \\ 0.2-x-1, & x > 0.2 \end{cases} \quad K_6(x) = \begin{cases} x-0.25, & x > 0.25 \\ 0.25-x-1, & 0 < x \leq 0.25 \end{cases}$$

$$K_7(x) = \begin{cases} 18-x, & 0 < x \leq 18 \\ 18-x-1, & x > 18 \end{cases} \quad K_8(x) = \begin{cases} 10-x, & 0 < x \leq 10 \\ 10-x-1, & x > 10 \end{cases}$$

$$K_9(x) = \begin{cases} 12-x, & 0 < x \leq 12 \\ 12-x-1, & x > 12 \end{cases} \quad K_{10}(x) = \begin{cases} 50-x, & 0 < x \leq 50 \\ 50-x-1, & x > 50 \end{cases}$$

$$K_{11}(x) = \begin{cases} 55-x, & 0 < x \leq 55 \\ 55-x-1, & x > 55 \end{cases} \quad K_{12}(x) = \begin{cases} x-0.95, & x > 0.95 \\ 0.95-x-1, & 0 < x \leq 0.95 \end{cases}$$

$$K_{13}(x) = \begin{cases} x-0.95, & x > 0.95 \\ 0.95-x-1, & 0 < x \leq 0.95 \end{cases} \quad K_{14}(x) = \begin{cases} x-0.95, & x > 0.95 \\ 0.95-x-1, & 0 < x \leq 0.95 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 K_{15}(x) &= \begin{cases} x-0.95, x > 0.95 \\ 0.95-x-1, 0 < x \leq 0.95 \end{cases} & K_{16}(x) &= \begin{cases} x-40, x > 40 \\ 40-x-1, 0 < x \leq 40 \end{cases} \\
 K_{17}(x) &= \begin{cases} x-30, x > 30 \\ 30-x-1, 0 < x \leq 30 \end{cases} & K_{18}(x) &= \begin{cases} x-30, x > 30 \\ 30-x-1, 0 < x \leq 30 \end{cases} \\
 K_{20}(x) &= \begin{cases} x-75, x > 75 \\ 75-x-1, 0 < x \leq 75 \end{cases} & K_{21}(x) &= \begin{cases} x-30, x > 30 \\ 30-x-1, 0 < x \leq 30 \end{cases} \\
 K_{22}(x) &= \begin{cases} x-2, x > 2 \\ 2-x-1, 0 < x \leq 2 \end{cases} & K_{23}(x) &= \begin{cases} x-0.85+0.1, 0.85 \leq x < 1 \\ x-0.65, 0.65 \leq x < 0.85 \\ x-0.65-1, x < 0.65 \end{cases} \\
 K_{24}(x) &= \begin{cases} x-0.85+0.1, 0.85 \leq x < 1 \\ x-0.75, 0.75 \leq x < 0.85 \\ x-0.75-1, x < 0.75 \end{cases} & K_{25}(x) &= \begin{cases} x-0.85+0.1, 0.85 \leq x < 1 \\ x-0.75, 0.75 \leq x < 0.85 \\ x-0.75-1, x < 0.75 \end{cases} \\
 K_{26}(x) &= \begin{cases} x-0.85+0.1, 0.85 \leq x < 1 \\ x-0.70, 0.70 \leq x < 0.85 \\ x-0.70-1, x < 0.70 \end{cases} & K_{27}(x) &= \begin{cases} 1, x = A \\ 0.75, x = B \\ 0.5, x = C \\ -1, x = D \end{cases} \\
 K_{28}(x) &= \begin{cases} 1, x = A \\ 0.75, x = B \\ 0.5, x = C \\ -1, x = D \end{cases} & K_{29}(x) &= \begin{cases} x-60, x > 60 \\ 60-x-1, 0 < x \leq 60 \end{cases} \\
 K_{30}(x) &= \begin{cases} 1, x = A \\ 0.75, x = B \\ 0.5, x = C \\ -1, x = D \end{cases} & K_{31}(x) &= \begin{cases} x-8, x > 8 \\ 8-x-1, 0 < x \leq 8 \end{cases}
 \end{aligned}$$

将各个衡量条件值分别代入关联函数中，得到关联函数值，即合格度，以关联函数  $K_3$  为例（其他合格度详见附录），如表 3-9 所示：

表 3-9 关联函数  $K_3$  的合格度

	补链企业 $X_1$	补链企业 $X_2$	补链企业 $X_3$	补链企业 $X_4$	补链企业 $X_5$
合格度	0.01	-1	0.01	-1	0.02

第五步，规范化。对合格度进行规范化得到规范合格度，以关联函数  $K_3$  为例（其他规范合格度详见附录），如表 3-10 所示：

表 3-10 关联函数  $K_3$  的规范合格度

	补链企业 $X_1$	补链企业 $X_2$	补链企业 $X_3$	补链企业 $X_4$	补链企业 $X_5$
规范合格度	0.5	-1	0.5	-1	1

第六步，计算优度。以补链企业  $X_1$  为例： $X_1$  关于衡量条件的规范合格度  $K(x_1)$  如表 3-11 所示（其他补链企业的规范合格度详见附录）：

表 3-11 补链企业  $x_1$  的规范合格度

$K^1_2$	$K^1_3$	$K^1_5$	$K^1_6$	$K^1_7$	$K^1_8$
-1	0.5	0.7142857	0.8571429	0.825	0.75
$K^1_9$	$K^1_{10}$	$K^1_{11}$	$K^1_{12}$	$K^1_{13}$	$K^1_{14}$
0.75	0.7142857	0.4	1	0.75	1
$K^1_{15}$	$K^1_{16}$	$K^1_{17}$	$K^1_{18}$	$K^1_{20}$	$K^1_{21}$
0.5	0.5	-1	1	0.7142857	-1
$K^1_{22}$	$K^1_{23}$	$K^1_{24}$	$K^1_{25}$	$K^1_{26}$	$K^1_{27}$
0.3333333	1	0.8333333	0.7142857	0.2	0.75
$K^1_{28}$	$K^1_{29}$	$K^1_{30}$	$K^1_{31}$		
1	-1	1	0.5		

则补链企业  $X_1$  的优度为：

$$C(X_1) = \alpha * K(X_1) = 0.4946598。$$

所有 5 个补链企业优度如表 3-12 所示。

表 3-12 所有补链企业的优度

	补链企业 $X_1$	补链企业 $X_2$	补链企业 $X_3$	补链企业 $X_4$	补链企业 $X_5$
优度	0.4946598	0.3696394	0.4488356	0.05430509	0.5801367
排序	3	5	4	2	1

综合考虑这 5 个补链企业对 32 个指标的取值范围的满足程度，补链企业  $X_5$  是最优的，补链企业  $X_2$  是相对最差的。具体计算过程见附录，并在 R2.6.0 统计软件环境中运行通过。

### 3.3.4 结果分析

在具体选择补链企业时,首先要考虑补链企业对于核心企业排放的废弃物的吸收能力;其次要考虑补链企业的优度值,当优度值大于零时,在可选范围内,当优度值小于零时,不在可选范围内;最后要考虑评价指标中的4个非满足不可的指标(即人均总产值、废弃物和副产品处理成本占总成本比例、资源消耗下降比率、高新技术占总产值比重);从而获得较好的生态效益和经济效益。

从评价结果可以看出,这5个补链企业的优度值都大于零,表明都在可选的范围之内。核心企业目前的废弃物排放为45万吨,补链企业 $x_5$ 需要该废弃物25万吨,作为生产建材产品C的主要原料,在这5个企业中的资源消耗下降比率最高,可以实现较好的环境效益;补链企业 $x_4$ 需要该废弃物12万吨,作为生产冶金产品的直接添加剂,在这5个企业中的人均总产值最高,可以实现较好的经济效益;补链企业 $x_1$ 需要该废弃物10万吨,为冶金类企业生产辅料,在这5个企业中的废弃物、副产品处理成本占总成本的比例最低,可以较好的节约生产成本;补链企业 $x_3$ 需要该废弃物5万吨,作为生产建材产品B的主要原料;补链企业 $x_2$ 需要该废弃物5万吨,作为生产建材产品A的主要原料。

补链企业 $x_3$ 在这5个企业中的高新技术占总产值比重最高,但是人均总产值最低;补链企业 $x_2$ 在排序中最低。因此,结合评价结果和这5个补链企业的实际情况,考虑到补链企业 $x_3$ 和 $x_2$ 与补链企业 $x_5$ 属于同一类产业,评价排序较低,并且核心企业的供应量已经可以满足补链企业 $x_5$ 、 $x_4$ 、 $x_1$ 的需求等原因,最后的选择结果为:选取补链企业 $x_5$ 、补链企业 $x_4$ 、补链企业 $x_1$ ,将补链企业 $x_3$ 、 $x_2$ 排除在选择范围之外。显然,核心企业与这3个补链企业链接后,延伸了生态产业链网结构中的产业链条,提高了资源利用率和减少了污染物的排放,获得了生态效益和经济效益。

### 3.4 本章小结

首先从生态产业链网延伸和发展的角度提出了补链企业的概念,对卡伦堡和贵港(制糖)国内外两个成功的生态工业园进行了探讨,从实践的角度分析了生态产业链网结构的发展过程引入补链企业情况,提出生态产业多样性是引入补链企业的主要依据,同时对生态产业链网的补链企业选取原则进行了定性分析。在研究国内外相关成果的基础上,建立了补链企业的评价指标体系,提出了将主观和客观赋权方法相结合的权重确定方法。由于可拓学中的优度评价法具有描述非满足不可的条件、用关联函数的正负值反映一个对象的利弊程度等优点,将其引入到生态产业链网结构的评价研究领域中,构建了选取补链企业的评价方法。

## 第四章 生态产业链网结构的协同收益分配模型研究

在生态产业链网结构的演化中,多个节点企业通过副产品交换,降低生产成本和交易成本,提高了资源的利用率。因此生态产业链网结构通过降低企业的合作和协调创造出单个节点企业不具有的新的收益。有些学者对于这种新增收益从工业共生的角度进行了存在性和具体核算等仿真或定量研究,并提出了共生效率、生态效益等概念。通过研究表明,新增收益的分配是否合理,即节点企业在合作中能否获得满意的收益,会影响生态产业链网结构的稳定发展。因此本章从耗散结构理论中的协同观点的角度,将这种新增收益界定为协同收益,重点研究了协同收益分配模型。

### 4.1 协同收益概念的提出

#### 4.1.1 生态产业链网结构中节点企业的协同关系

从生态产业链网结构来看,节点企业之间是以立体网络形式相互作用。链网中存在着资源、企业、环境之间相互依存、相互作用的上下游关系,节点企业之间通过废弃资源相互连接成具有垂直结构的网络,如图 4-1 所示由多层节点企业构成的网络,下层节点企业均以上级节点企业的废弃物为主要原材料。

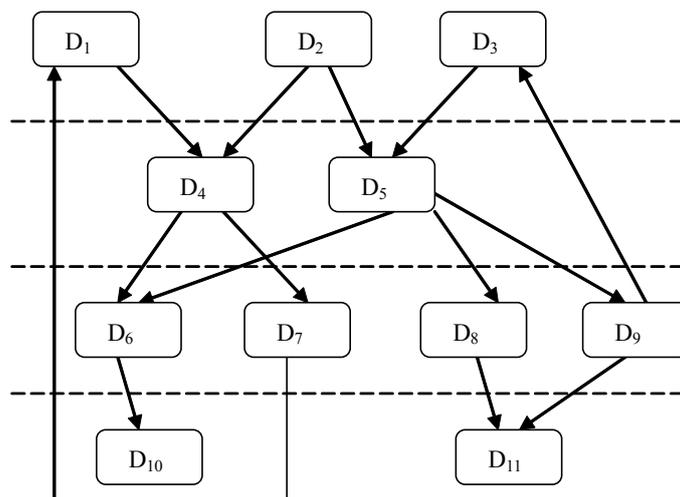


图4-1 具有垂直结构的生态产业链网结构

蒙西工业园 CO<sub>2</sub> 循环经济链（如图 4-2 所示<sup>[143]</sup>）就是这种垂直结构模型,首先是从水泥窑炉尾气中回收 CO<sub>2</sub>,形成液态 CO<sub>2</sub>,一方面用于园区纳米碳酸钙生产,另一方面用于可降解塑料生产,那么 CO<sub>2</sub> 回收与碳酸钙生产之间就是垂直

关系，CO<sub>2</sub>回收与可降解塑料生产之间也是垂直关系，而碳酸钙生产与可降解塑料生产之间就是水平关系。

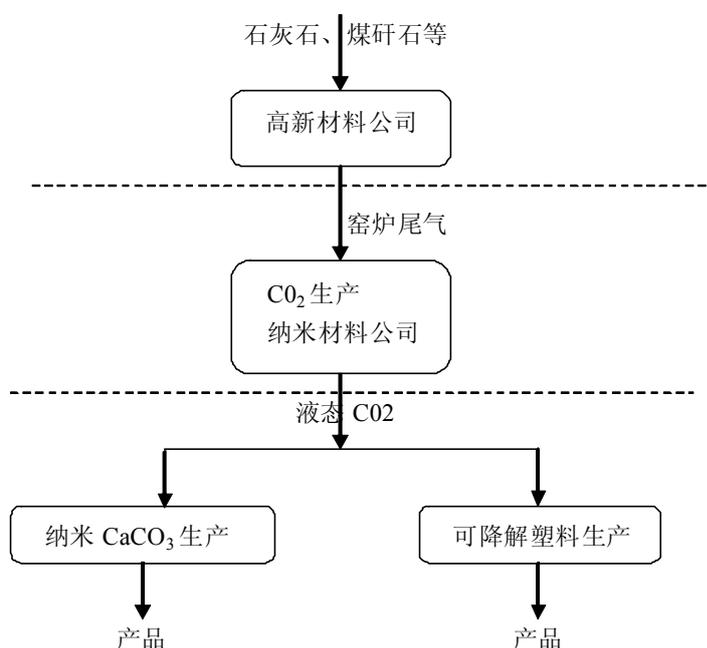


图4-2 蒙西工业园CO<sub>2</sub>生态产业链

根据上述分析得出，通过生态产业链网结构中的物质流、能源流、资金流、信息流循环流动，不同链条上的节点企业之间利用主、副产品和原料之间的协同共生关系形成一个纵、横交错的生态产业链网结构。节点企业从各自的上游企业获得原料供给进行生产活动，这种紧密的协作和相互依赖的关系促使链网不断的发展变化。所以说，各节点企业之间的生态协同促进节点企业生产效率的提高，实现资源、信息和能量闭环高效流动，进而提高整个生态产业链网结构的运行效率。

王兆华<sup>[89]</sup>已经从成本推动的角度得出，追求低成本（等同于追求高收益）是节点企业建立协同生产的基本动力。因此收益分配是节点企业的一个重要且敏感的问题，合理的收益分配机制对于节点企业之间的协同生产的正常运行无疑是非常重要的。

#### 4.1.2 协同收益的定义

何谓收益？“天下熙熙，皆为利来；天下攘攘，皆为利往。”道出了收益存在的普遍性；“社会化的需要，人们通过一定的社会关系表现出来的需要。利益在本质上属于社会关系范畴。社会主体维持自身的生存和发展，只有通过对社会产品的占有和享有才能实现，社会主体与社会劳动产品的这种对立统一关系就是利益”，这一观点揭示了收益的实质。

在生态产业链网结构的演化中，多个节点企业相互进行副产品交换，形成一个若干要素相互关联的具有特定功能的有机整体。使链网从整体具有部分或部分总和所没有的新的功能。这种新功能的产生，主要是源于链网内的节点企业相互之间在知识、信息和技术创新等方面的合作行为，并促进知识、技术和企业文化等因素在节点企业之间的流动与传播，从而提升整个链网在生态技术的综合研发、新产品的快速开发、市场的有效拓展、规模经济的形成以及柔性制造等方面的整体能力。那么链网整体的资源和能力就不仅仅是各个企业资源和能力的总和，而是会出现“1+1>2”的整体性效果。

基于上述分析，本文认为生态产业链网结构的协同收益是指生态产业链网结构中的节点企业通过副产品交换等方式进行协同生产，从而作为一个整体而创造出来的新增收益。

### 4.1.3 协同收益的来源

生态产业链网结构中的协同收益形成的根本原因在于通过相互协同生产，起到降低节点企业成本或者是形成产品差异化和品牌化的作用，主要来源有副产品交换、资源共享、节点企业的相互信任和链网的正外部性等效应。

#### 1. 副产品交换效应

副产品交换效应<sup>[102]</sup>指的是在链网中某些节点企业之间通过交换或利用废弃物或副产品实现了相互受益并获得了新增收益。如图 4-3 所示，假设有两个进行副产品交换的节点企业 1 和节点企业 2，副产品交换有利于降低节点企业的制造成本 PC（较低的原材料采购价格）和原材料的交易费用 TC，同时避免环境规制导致的损失 EC，进而形成副产品交换效应，形成了节点企业的协同收益。

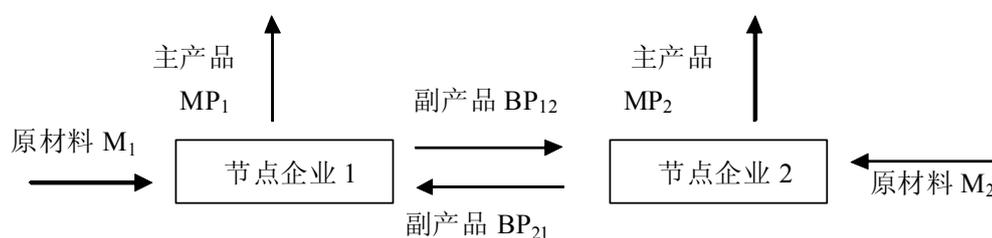


图 4-3 副产品交换示意图

假设节点企业 1 和节点企业 2 未进行副产品交换的利润函数  $\pi_1$ 、 $\pi_2$ ，分别为：

$$\pi_1 = R(MP_1) - (PC_1 + TC_1) - C(BP_{21}) - EC(BP_{12}) \quad (4-1)$$

$$\pi_2 = R(MP_2) - (PC_2 + TC_2) - C(BP_{12}) - EC(BP_{21}) \quad (4-2)$$

上式中,  $R(MP_i)$  表示节点企业  $i$  的主产品收益,  $(PC_i + TC_i)$  表示节点企业  $i$  的除副产品原料投入之外的其他生产和交易费用,  $i=1, 2$ ;  $C(BP_{12})$ 、 $C(BP_{21})$  分别表示节点企业 1 和节点企业 2 在没有进行副产品交换时, 直接从外部市场购入原材料所发生的所有成本;  $EC(BP_{12})$ 、 $EC(BP_{21})$  分别表示节点企业 1 和节点企业 2 由于不进行副产品交换, 在现有环境规制情况下节点企业 1 和节点企业 2 的污染处罚。

由于节点企业 1 和节点企业 2 进行副产品交换, 使其原材料采购价格有所降低, 同时还由于将副产品转换成了另一节点企业的原材料, 副产品出售方可以获得一定的收益, 且在一定程度上避免环境污染处罚的损失。

则节点企业 1 和节点企业 2 进行副产品交换后的利润函数  $\pi'_1$ 、 $\pi'_2$  分别为:

$$\pi'_1 = R(MP_1) - (PC_1 + TC_1) - C'(BP_{21}) + [R'(BP_{12}) - C(BP_{12})] - EC'(BP_{12}) \quad (4-3)$$

$$\pi'_2 = R(MP_2) - (PC_2 + TC_2) - C'(BP_{12}) + [R'(BP_{21}) - C(BP_{21})] - EC'(BP_{21}) \quad (4-4)$$

上式中,  $R(MP_i)$  表示节点企业  $i$  的主产品收益,  $(PC_i + TC_i)$  表示节点企业  $i$  的除副产品原料投入之外的其他生产和交易费用,  $i=1, 2$ ;  $C'(BP_{12})$ 、 $C'(BP_{21})$  分别表示节点企业 1 和节点企业 2 为了满足下游企业要求, 而对副产品进行预处理所发生的所有成本;  $R'(BP_{12})$ 、 $R'(BP_{21})$  分别表示节点企业 1 和节点企业 2 与下游企业进行副产品交换所获得的收益;  $C(BP_{12})$ 、 $C(BP_{21})$  分别表示节点企业 1 和节点企业 2 为达到生产要求对副产品进行再加工所支付的成本;  $EC'(BP_{12})$ 、 $EC'(BP_{21})$  分别表示节点企业 1 和节点企业 2 在现有环境规制情况下污染处罚的损失。一般有以下不等式成立:

$$F'_E(BP_{12}) \leq F_E(BP_{12}) \quad (4-5)$$

$$F'_E(BP_{21}) \leq F_E(BP_{21}) \quad (4-6)$$

比较  $\pi_1$ 、 $\pi'_1$  和  $\pi_2$ 、 $\pi'_2$ , 可知只要存在不等式:

$$C'(BP_{21}) + C(BP_{12}) + F'_E(BP_{12}) - R'(BP_{12}) \leq C(BP_{21}) + F_E(BP_{12}) \quad (4-7)$$

$$C'(BP_{12}) + C(BP_{21}) + F'_E(BP_{21}) - R'(BP_{21}) \leq C(BP_{12}) + F_E(BP_{21}) \quad (4-8)$$

则有不等式:

$$\pi_1 \leq \pi'_1 \quad (4-9)$$

$$\pi_2 \leq \pi'_2 \quad (4-10)$$

成立。

也就是说, 只要以下不等式成立:

副产品交换所发生的所有成本—进行副产品交换所获得的收益

≤不进行副产品交换所发生的所有成本  
那么节点企业的净利润就可以得到提高，副产品交换效应得以实现。

## 2. 资源共享效应

共享资源是指链网内部那些节点企业所共享的无形或深层次的资源或能力（如创新性知识、组织学习能力等无形的战略性资产），这类资源或能力具有公共物品特性。因此，共享性资源成为链网内部企业相对于外部企业获取竞争优势的重要源泉，如专业化分工、地理性临近、组织性临近、生产相互关联等优势。专业化分工可以使节点企业达到或接近最优生产规模，可以使生态产业链网结构内共生企业在获得规模经济的同时获得范围经济；地理空间上的临近促进节点企业间的知识与信息的流动，尤其是隐性知识与技能的传递，这大大降低了信息沟通的成本；组织性临近增加了节点企业之间对知识吸收利用的程度；链网与相关机构间的相互关联降低了交易费用。这些特性相互作用，共同培育出链网的具有价值性、难以模仿、难以替代的异质性资源。

链网中企业的资源共享，借助信息技术，提高了收集、存储、组织和运用节点企业内资源的能力；通过设计有利于资源共享和创新的节点企业激励机制，提高了不断创造新的专业知识和技能，并将这些专业知识和技能提供给节点企业内其他员工的积极性，从而提高获取资源的能力。这一资源共享和创新的过程，也将导致节点企业生产成本、管理成本和交易费用的相对下降，即积累同样数量的产出时，生产的边际成本可以下降得更快，致使节点企业可以获得更多的超额收益。

## 3. 节点企业的相互信任效应

共享性资源能够有效发挥其作用的前提和基础是生态产业链网结构内形成一种的“信任”网络。从概率论的角度来讲，信任可以理解为一个体估计另一个体采取某种特定行为的可能的客观概率。从博弈论的角度来看，信任的形成往往是节点企业自身主观上追求长期利益的理性选择的结果。尤其在链网内，节点企业的决策行为是直接相互影响的，一个节点企业在决策时就必须考虑对方的反应，而且还要兼顾暂时和长远利润，也就是说，节点企业的效用函数不仅取决于它自己的选择，而且还依赖于其它节点企业的选择。显然，这样选择的前提是当节点企业处于不同的信用层面时，其可能得到的经济收益也是不同。

下面通过一次博弈和重复博弈<sup>[102]</sup>来说明。

1) 在博弈论中，将一次性交易称为一次博弈。在存在信息不对称的情况下，博弈双方往往会采取个人效用最大化（机会主义），个体的理性最终却造成了集体的非理性。表 4-1 表示的是节点企业 A 和 B 在一次博弈中的支付矩阵。假定 A、

B 交易成功的话，他们从交易中获得的总交易收益为 2 倍  $R_1$  单位。如果双方都选择不守信，则交易失败，各自得到  $R_4$  支付；如果双方都选择守信，收益在双方平分，双方各得收益  $R_1$  单位；如果一方守信而另一方不守信，则守信一方仅得到收益  $R_2$ （若该值为负数表示额外的损失），不守信方由于利用对方的合作谋取额外收益，可以侵占合作一方的利益，得到收益  $R_3$ 。据此，不失一般性，可以假设上述各收益间存在下列不等式： $R_3 > R_1 > R_4 > R_2$ 。

表 4-1 一次博弈支付矩阵

		节点企业 A	
		守信	不守信
节点企 业 B	守信	$R_1, R_1$	$R_2, R_3$
	不守信	$R_3, R_2$	$R_4, R_4$

在该支付矩阵中，最后的均衡为（不守信，不守信），相对应的纳什均衡结果是  $(R_4, R_4)$ ，显然小于策略组合（守信，守信）的收益  $(R_1, R_1)$ ，所以（不守信，不守信）策略组合不是一个帕累托最优，也就是说是无效率的。

2) 当生态产业链网结构的节点企业之间存在有意识的合作共生关系，相互之间的决策行为会直接相互影响，因此在决策时必须考虑对方的反应。这种重复多次的交易称为重复博弈，这种情况还要兼顾暂时利润和长远利润。

引入贴现因子  $\delta$  考虑时间因素，不失一般性假设双方折现因子相同。 $\delta$  的含义为：当  $\delta$  越趋于 0 时，表明博弈各方对未来收益越不关心； $\delta$  越趋于 1 表明博弈各方对未来收益与对当前收益评价相当。

求解该博弈：首先在  $n-1$  阶段博弈双方都选择守信，也就是说策略组合为（守信，守信）；直至其中一方在  $n$  阶段选择了不守信，谋求额外利益，另一方则在  $n+1$  采取相对策略，也选择不守信，博弈回到策略组合（不守信，不守信）。具体分析如下：

(1) 博弈各方始终选择（守信，守信）策略组合，则各方的总效用  $U_1$  为：

$$U_1 = \sum_{k=0}^{\infty} R_1 \delta^k = \frac{R_1}{(1-\delta)} = \sum_{k=0}^n R_1 \delta^k + \sum_{k=n+1}^{\infty} R_1 \delta^k = \sum_{k=0}^n R_1 \delta^k + \frac{R_1}{(1-\delta)} \delta^{n+1} \quad (4-13)$$

(2) 一方在  $n$  阶段选择了不守信，谋求额外利益，另一方则在  $n+1$  采取相对策略，也选择不守信，博弈回到（不守信，不守信）这个策略组合，并直至以后所有阶段，则首先选择不守信一方的总效用  $U_2$  为：

$$U_2 = \sum_{k=0}^n R_1 \delta^k + R_3 \delta^{n+1} + \sum_{k=n+2}^{\infty} R_4 \delta^k = \sum_{k=0}^n R_1 \delta^k + R_3 \delta^{n+1} + \frac{R_4}{(1-\delta)} \delta^{n+2} \quad (4-14)$$

当  $U_1 \geq U_2$  时, 将始终采取(守信, 守信)策略组合, 按照式(4-13)和式(4-14), 可以解得, 当下式成立时:

$$\delta \geq \frac{R_3 - R_1}{R_3 - R_4} \quad (4-15)$$

$U_1 \geq U_2$  成立。双方将采取守信策略。  $\delta$  足够大时双方看重合作给双方带来较好的收益时, 彼此将采取合作与信任的态度。

不失一般性, 假设  $R_3=2R_1$ ,  $R_4=0$ ,  $R_2<0$ , 由不等式(4-15), 可以解得:

$$\delta \geq 0.5$$

折算成折现率  $i$ , 则为:

$$\delta = \frac{1}{1+i} \geq 0.5 \quad (4-16)$$

解之得:

$$i \leq 1 \quad (4-17)$$

显然, 这是个相当容易满足的条件。也就是说, 当式 (4-17)成立时, 均衡的策略组合(守信, 守信)是一个帕累托最优。重复博弈比一次博弈更有效率, 实现了集体理性。理性的局中人为了合作的长远利益, 愿意抵挡不守信带来的一次性好处的诱惑。

链网内的各个节点企业, 在长期的交易中奠定了良好的信任和承诺基础, 提高了失信与违约成本。这种高信用关系导致了更高的资源共享和合作效率, 降低了交易费用和生产制造成本。

#### 4. 正外部性效应

外部性是由英国福利经济学家庇古提出, 并由美国新制度经济学家科斯加以丰富和完善的一个重要经济学概念。它是指经济主体之活动对与该活动无直接关系的他人或社会所产生的影响。

根据经济主体之活动对他人或社会影响的利弊, 外部性又可分为正外部性和负外部性<sup>[146]</sup>。正外部性是指“在很多情况下, 某个经济主体(生产者或消费者)的一项经济活动会给社会上其他成员带来好处, 但他自己却不能由此得到补偿。此时从其活动得到的利益就小于该活动带来的社会利益”。负外部性是指“另在很多情况下, 某个经济主体(生产者或消费者)的一项经济活动会对社会上其他成员带来危害, 但他并不为此支付足够补偿这种危害的成本。在经济学看来, 无论是正外部性还是负外部性都会导致资源配置不当, 应采取措施对经济主体进行调节以便实现资源的最佳配置。在正外部性的条件下, 经济主体的私人收益小于社会收益, 补偿这一正外部性可以通过科斯手段(市场交易)或者是庇古手段(税

收补贴等)使正外部性在一定程度上内部化。

生态产业链网结构产生的正外部性效应的前提和基础就是副产品交换效应,在生态产业链网结构中以降低环境侵害压力的前提,通过技术创新和工艺改进,在生产过程中将潜在的生产剩余物数量和有害性减少到最小;通过资源回收、再利用和无害化处置对既成剩余物进行物理上的变性,使链网中排放物带给环境的侵害最低。由此生态产业链网结构可以创造一个经济发展和环境保护的双赢局面,这正是生态产业链网结构为社会创造的正外部性效应。

## 4.2 协同收益分配对节点企业协同关系的影响分析

### 4.2.1 协同收益分配的定义

一般意义上的收益分配是指在合作过程中所产生的收益在各个参与者之间进行分配和分割。生态产业链网结构中的协同收益的分配就是各节点企业在协同生产过程中共同创造和实现的协同收益,按照一定的分配原则进行分配的过程。

与一般企业一样,节点企业之间相互(或顺序地)购买产品或服务,通过自己的生产活动,实现对输入物品(原材料、信息、服务等)的增值,获得应有的生产利润,该部分收益是明确的,一般不存在分配纠纷等问题。但由于协同收益中的隐性收益是所有成员共同创造的,没有明确的形态和数量。因此,这种协同收益的分配不仅包括显性或直接收益,同时还应包括各个节点企业在协同生产过程中所产生的隐性收益。

### 4.2.2 考虑协同收益分配的节点企业进化博弈

#### 1. 节点企业参与副产品交换的基本假设

如果任意局中人  $i$  的某个策略是进化稳定策略,则在该策略时它的期望收益支付不小于任何其他策略下的期望收益支付,并且即使其他局中人不采用进化稳定策略,局中人  $i$  采用进化稳定策略时的期望收益仍然大于它在不采用进化稳定策略时的期望支付。

在有限理性博弈中,博弈方对策选择概率的动态变化速度取决于局中人的学习能力和速度,又称之为复制动态方程。根据进化博弈理论,如果某种策略的适应度或支付比系统的平均适应度高,这种策略就会在系统中发展,体现为这种策略的增长率大于零。从这个意义上来说,进化稳定策略的均衡点实际上存在于使增长率等于 0 的位置。在这个位置上博弈各方达到进化稳定策略,不完全理性的博弈群体通过学习最终找到了比较高效的纳什均衡。

需要说明的是,这里考虑的协同收益仅包括技术、价格、盈利等方面的综合收益。对于如吸收学习能力、灵感、声誉等收益,由于其本身的不可精确测量性,在这里暂时不予考虑。在分析链网中某一条生态产业链上有多个节点企业进行副产品交换的进化博弈之前,首先做一些基本假设。

1) 假设在生态产业链网结构中,存在节点企业的个数为  $w(w \geq 2)$ , 节点企业的收益创造阶段数分别为  $n_1, n_2, \dots, n_w$ 。针对每个具体的阶段,都有交换和独立运作两种选择。在节点企业进行副产品交换的动态博弈过程中,企业  $i$  在博弈进行到第  $t$  个阶段选择协同的收益创造阶段数为  $V_i(t) (0 \leq V_i(t) \leq n_i, i=1, 2, \dots, w)$ 。副产品交换关系的演化将主要由节点企业选择协同的阶段数  $V_i(t)$  的发展变化情况来看表示,  $V_i(t)$  的演化结果即为链网内的节点企业经过长期重复博弈所达到的稳定或不稳定的均衡状态。

2) 假设节点企业针对具体收益创造阶段进行协同生产所带来的额外协同成本可以表示为  $C_{j_i}^{(t)}$  ( $j_i=1, 2, \dots, n_i; i=1, 2, \dots, w$ ), 进行独立运作则没有额外成本产生。

3) 在相应的收益创造阶段上,假设与协同作用相关的生产率为  $E_{j_i}^{(t)}$  ( $j_i=1, 2, \dots, n_i; i=1, 2, \dots, w$ )。在不考虑协同成本的情况下,节点企业  $i$  在  $V_i(t)$  个环节上选择协同所创造的价值可以表示成  $\sum_{j_i=1}^{V_i(t)} E_{j_i}^{(t)}$ ,  $E_{j_i}^{(t)}$  的值可正可负。

4) 为了简单明了的说明问题,用  $s$  代表节点企业之间协同收益的分配状况。

假设当博弈进行到第  $t$  阶段时,  $w$  个节点企业由协同作用所创造的收益可以分别表示为:

$$\sum_{j_1=1}^{V_1(t)} E_{j_1}^{(1)}, \sum_{j_2=1}^{V_2(t)} E_{j_2}^{(2)}, \dots, \sum_{j_w=1}^{V_w(t)} E_{j_w}^{(w)}。$$

则通过协同创造的总价值为:

$$\sum_{i=1}^w \sum_{j_i=1}^{V_i(t)} E_{j_i}^{(t)}。$$

## 2. 进化博弈模型的建立与求解

假定协同收益将按照  $(\sum_{j_1=1}^{V_1(t)} E_{j_1}^{(1)})^s, (\sum_{j_2=1}^{V_2(t)} E_{j_2}^{(2)})^s, \dots, (\sum_{j_w=1}^{V_w(t)} E_{j_w}^{(w)})^s$  的比例关系在企业之

间进行分配。假设同一企业不同收益创造阶段的协同生产率相同,即有:

$$E_1^{(t)} = E_2^{(t)} = \dots = E_{n_i}^{(t)} = E_i \quad (i=1, 2, \dots, w)$$

当博弈进行到第  $t$  阶段时, 企业  $i$  通过协同所创造的收益就可以表示为:

$$V_i(t)E_i$$

再假设节点企业在不同收益创造阶段的协同成本相同, 即有:

$$C_1^{(t)} = \dots = C_{n_w}^{(t)} = C_i$$

由此可以得到, 在博弈进行到第  $t$  个阶段时, 企业  $i$  在第  $j_i$  个收益创造阶段选择协同所获得的收益<sup>[148, 149]</sup>可以表示为

$$\varphi_{j_i}^{(t)}(t, V_i(t)) = \frac{1}{n_i} \frac{(V_i(t)E_i)^s}{\left(\sum_{i=1}^w V_i(t)E_i\right)^s} \sum_{i=1}^w V_i(t)E_i - C_i \quad (4-25)$$

如果节点企业  $i$  决定在第  $j_i$  环节选择独立运作而不是协同, 则节点企业  $i$  中将存在  $V_i(t) - 1$  个协同环节, 由此可得第  $j_i$  个收益创造阶段的收益为:

$$\varphi_{j_i}^{(t)}(t, V_i(t) - 1) = \frac{1}{n_i} \frac{((V_i(t) - 1)E_i)^s}{\left(\sum_{i=1}^w V_i(t)E_i - E_i\right)^s} \left(\sum_{i=1}^w V_i(t)E_i - E_i\right) - C_i \quad (4-26)$$

将公式(4-25)和公式(4-26)相互比较可以得到, 如果有:

$$\varphi_{j_i}^{(t)}(t, V_i(t)) > \varphi_{j_i}^{(t)}(t, V_i(t) - 1)$$

即节点企业  $i$  在第  $j_i$  个收益创造阶段协同产生的收益大于独立运作所带来的收益时, 则节点企业  $i$  在该环节就会选择协同而不是独立运作。

则节点企业  $i$  在第  $j_i$  个环节上选择协同的超额收益为

$$\varphi_{j_i}^{(t)} = \frac{1}{n_i} \left[ \frac{(V_i(t)E_i)^s \sum_{i=1}^w V_i(t)E_i - ((V_i(t) - 1)E_i)^s \left(\sum_{i=1}^w V_i(t)E_i - E_i\right)}{\left(\sum_{i=1}^w V_i(t)E_i\right)^s - \left(\sum_{i=1}^w V_i(t)E_i - E_i\right)^s} \right] \quad (4-27)$$

当  $s$ ,  $n_i$ ,  $E_i$  固定时,  $\varphi_{j_i}^{(t)}$  为博弈阶段  $t$  的函数:

$$\varphi_{j_i}^{(t)} = \varphi_{j_i}^{(t)}(t)$$

节点企业  $i$  在第  $j_i$  个环节上选择协同的充要条件可以表示为:

$$\varphi_{j_i}^{(t)}(t) > C_i$$

只要协同所得的超额收益大于协同成本, 随着博弈的进行, 节点企业就有当前独立运作的阶段上选择协同的积极性。对于节点企业  $i$  来讲, 当其他节点企业在收益创造阶段上的状态给定时, 主要有以下演化路径:

1) 当条件  $\varphi_{ji}^{(t)} > C_i$  满足时, 在博弈进行的下一个阶段, 节点企业  $i$  将在第  $j_i$  阶段上选择协同, 由此可以得到  $V_i(t+1) = V_i(t) + 1$ , 一直进行到满足  $\varphi_{ji}^{(t)} = C_i$  或者  $V_i(t) = n_i$  为止;

2) 如果  $\varphi_{ji}^{(t)} < C_i$ , 在博弈进行的下一个阶段, 节点企业  $i$  将会在第  $j_i$  阶段上上选择独立运作, 由此可以得到  $V_i(t+1) = V_i(t) - 1$ , 并且会一直持续到  $\varphi_{ji}^{(t)} = C_i$  或者  $V_i(t) = 0$  为止。

根据上述分析, 在副产品交换的重复博弈过程中, 节点企业作为有限理性的参与者, 对具体收益创造阶段的不同策略所造成的差异具有一定的统计分析和事后判断的能力。具体来说, 主要有以下结论:

1) 不同策略造成的收益差越大, 节点企业调整速度越快;

2) 假设收益在节点企业的不同收益创造阶段之间是平均分配的, 收益创造阶段数越小, 则每个具体阶段所分得的收益越多, 节点企业进行策略调整的积极性就越大;

3)  $s$  值越倾向于鼓励协同并对协同生产率高的节点企业分配更多收益, 则该节点企业向协同策略调整的速度越快, 反之则向独立运作的策略调整速度越快。

根据以上结论, 我们可以得出协同收益的分配机制决定着节点企业选择协同的积极性以及链网的稳定性程度。生态产业链网结构内部节点企业在相互联系、相互作用的过程中演化的方向则主要取决于节点企业之间生态协同所带来收益的性质和大小, 这将会改变节点企业在策略选择上的偏好, 从而导致链网结构的变化, 如果协同收益分配不合理会导致节点企业在发展上的差异性 (这里的协同收益主要是指对所有节点企业都有价值的收益, 如利润、市场份额等), 这种差异性使节点企业之间改变它们相互依存的程度或合作关系, 从而使链网会产生不可预测的动态行为, 因此节点企业之间协同收益分配是否合理会对协同的力度和效应造成的重大影响, 最终影响到生态产业链网结构的良性发展。

### 4.2.3 协同收益分配的原则

协同利益的获得主要依赖于节点企业的协作关系, 任何一家企业如果仅凭借自身的努力, 都不可能获得这种协同利益, 生态产业链网结构通过创造比单个企业更多的经济利益而形成生态合作关系, 也正是出于获得更多收益的愿望, 各个节点企业才愿意合作。协同收益分配应该既能使单独的企业为了更多收益愿意合作, 也能使合作的企业由于收益分配不均而解除合作关系。

但是协同收益的分配存在一定的复杂性。首先是协同收益的多样性和不确定性,协同利益有的可以观测到,有的不可观测到;有的是集体共享,具有外在性,有的是个体独享,具有排他性;有的可以比较,有的不可以比较。这使得协同收益在形成、运作过程中,那些难以在事先确定并通过合约控制的因素,具有很大的不确定性;其次是不一致性,链网作为一个整体参与市场活动,但内部企业分工不同,协同收益的实现可能局限于一部分节点企业,其他节点企业的努力会无形中转移给这部分企业,从而产生付出努力与获得回报之间的不一致性。另外,由于节点企业各自的企业文化、价值观、收集的信息以及信息处理的方式等方面都有所不同,必然会导致对同一问题产生不相同的认识,存在不同的偏好,由此产生对协同收益认知的不一致性。

因此协同收益分配是否合理决定了链网在其生命周期内能否稳定运行,收益分配问题也就成为链网中节点企业协同是否能够顺利的非常重要的问题。为了使协同收益得到公平、合理地分配,一般情况下,协同收益分配时应遵循以下原则:

### 1. 公平兼顾效率的原则

链网的持续发展离不开各节点企业的相互协同生产,在合作中的地位和权力是平等的,公平有助于提高中间环节中节点企业的积极性。如果节点企业相互间收益分配不平等,不协调和低效率的现象会影响整个链网的绩效,也就不可能形成长期的合作关系,更不能保证整个链网高效的运转,当然也就不能实现链网最大利益,因此公平原则要保证加入链网的节点企业从中获取的利益要大于不加入链网的利益,否则节点企业就不会加入。

但过分的公平可能会挫伤生态产业链网结构中规模大效益好的企业的积极性,所以在制定分配制度时,必须在公平和效益之间找一个平衡,即公平也兼顾效益。

### 2. 个体合理原则

在收益分配过程中,最容易产生分歧引起纠纷的,是在实践中出现的协议中无规定的或规定不明确的新增利益,尤其是链网中的专利权、技术诀窍、商标、商誉等无形资产所带来的收益。要保证每个节点企业都能获取相应的利益,否则将会损害节点企业的积极性。要保证每个节点企业参与生态产业链网结构所得到的收益应大于独立生产时所获得的收益。

### 3. 利益与风险挂钩原则

从经济学的角度来看,节点企业所承担的风险越大,其所获的利益也应该越多,因此在制定协同收益分配比例时,要充分考虑各类风险的测算,以科学的理

论为基础制定的企业利益分配方案将更能让节点企业接受。在具体实施时,可以采用先由节点企业提出初始的利益分配方案,而核心企业再引导节点企业对所有初始方案进行选择或修改。

#### 4. 努力程度和贡献与分配相对称原则

生态产业链网结构发展的根本动力在于节点企业的创新性活动,尤其是生态技术的研发。鼓励创新性活动,收益分配中应该体现创新性努力程度。同样的道理,节点企业贡献越大则分配的收益也应越大,否则影响节点企业的积极性,也影响链网运行的稳定性。

### 4.3 生态产业链网结构的协同收益分配模型

#### 4.3.1 现有收益分配方法评价

1953年sharpley给出了n人合作收益分配的一种方法,Shapely方法<sup>[152]</sup>严格证明了合作者公平的分配应该是合作者参与的所有合作的贡献的加权平均值。它考虑了各参与方对协同总收益的重要程度,并以此为依据进行收益的分配,然而在实际的协同形成的过程中,对于加入的企业而言是存在协同风险的,也会产生交易成本。企业的资本增值率同样是影响分配的一个重要因素。对于一个资本增值能力强的公司,如果其资本增值率较高,那么,按照贡献大小的原则就应该在分配中获得较高的份额。但是shapely值法只是按照企业的平均贡献来分配收益,因此,这样的分配是不公平的,会损害贡献大的企业的积极性,必将威胁到整个系统的稳定和安全。企业的投资水平也是影响收益分配和稳定性的重要因素。对于那些付出了巨大努力却得不到相应回报的企业,长此以往,必将损害这些企业的积极性,导致生态协同效率的下降,最终也会使生态产业链网结构走向失败。

目前文献所涉及到的各类Nash谈判模型<sup>[158]</sup>都考虑到分配因子和每个企业的效用,分配因子由企业在联盟中的地位决定,但是目前现有的确定分配因子和效用的方法主观性比较强,没有统一的标准,基本都是靠专家意见决定,实际操作时易受人为因素影响,可靠性不高。另外,Nash谈判模型的指导原则只考虑了公平,容易操作,但是没有兼顾激励,很难做到奖勤罚懒,从而也就没有考虑收益分配的激励作用。

此外,群体加权重新法、核心法、 $\tau$ 值法和MCRS法等利益分配方法,仅仅考虑了公平,容易操作,但是没有考虑收益分配的激励作用,如应该体现每个企业的努力水平,使生态产业链网结构的生态生产向更好的方向发展。结合上述收益分配模型的不足和分配原则,本文采用体现生态贡献、协同水平、投入水平

和承担的风险四个因子的协同收益分配模型。

### 4.3.2 协同收益分配模型的构建

#### 1. 协同收益分配的影响因素

以生态产业链网结构中各节点企业追求自身收益最大化为目标函数,研究协同收益分配的影响因素。为简化分析,仅考虑两个节点企业:核心企业和补链企业。由于补链企业与核心企业相比较,其生产成本容易成为沉没成本,因此假设核心企业 A 只付出创新性成本,补链企业 B 的成本由生产性成本和创新性成本组成,其中,生产性成本相对变动较小,在这里假设其为常数。

设补链企业的生产性成本为  $C_{Bp}$ 。创新性努力  $E_B$  和创新性成本  $C_B(E_B)$  有如下关系:  $C_B'(E_B) > 0, C_B''(E_B) > 0$ 。即创新性成本是创新性努力的增函数,且以加速度增加;假设核心企业的创新性努力  $E_A$  和创新性成本  $C_A(E_A)$  有如下关系:  $C_A'(E_A) > 0, C_A''(E_A) > 0$ , 即创新性成本是创新性努力的增函数,且以加速度增加。假设创造的协同收益为:  $R = d_A(E_A) + d_B(E_B) + \xi$ 。其中,  $d_A(E_A)$  和  $d_B(E_B)$  分别为 A 和 B 对协同收益的贡献,以减速度增加,即存在以下关系:  $d_A'(E_A) > 0, d_A''(E_A) < 0, d_B'(E_B) > 0, d_B''(E_B) < 0$ ;  $\xi$  为协同生产过程中存在的随机干扰变量,假设服从  $N(0, \sigma^2)$  正态分布。又由于  $E_A$  和  $E_B$  不易量化,则  $d_A(E_A)$  和  $d_B(E_B)$  不能作为契约依据。假设协同收益分配契约规定:补链企业享有如下分配方案:  $S = S_0 + m \times R$ , 其中,  $R$  为总的协同收益,  $S_0$  为固定报酬,  $m$  为收益分配系数 ( $0 \leq m \leq 1$ )。则 A 收益分配后的总收益为:  $w_1 = R - C_A(E_A) - S$ , 假设相应效用函数为  $v(w_1)$ 。B 收益分配后的总收益为:  $w_2 = S - C_{Bp} - C_B(E_B)$ , 假设相应效用函数为  $u(w_2)$ , 并且由于受到  $\xi$  的影响,  $R$ 、 $S$ 、 $w_1$ 、 $w_2$  都服从正态分布。假设 B 的保留收入为  $w_0$ , 则保留效用为  $u(w_0)$ 。则协同收益分配的一般模型为:

$$\max E[v(R - C_A(E_A) - S)] \quad (4-28)$$

s.t.

$$E[u(S - C_{Bp} - C_B(E_B))] \geq u(w_0)$$

$$\max E[u(S - C_{Bp} - C_B(E_B))]$$

假设 A 为风险中性,则期望效用=期望收入,不存在风险成本;B 为风险规避,则收益风险会造成额外的风险成本,用  $f$  ( $f > 0$ ) 表示其风险规避系数,则 B 的风险成本  $C_F(w_2)$  为:

$$C_F(w_2) = \frac{1}{2} f \times \text{Var}(S) = \frac{1}{2} f m^2 \sigma^2 \quad (4-29)$$

则式 (4-28) 等价于:

$$\begin{aligned} & \max(1-m)[d_A(E_A) + d_B(E_B)] - C_A(E_A - S_0) \quad (4-30) \\ & s.t. \\ & S_0 + m[d_A(E_A) + d_B(E_B)] - \frac{1}{2}fEm^2\sigma^2 - C_{Bp} - C_B(E_B) \geq w_0 \\ & E_B \in \arg \max[S_0 + md_A(E_A) + md_B(E_B)] - \frac{1}{2}fm^2\sigma^2 - C_{Bp} - C_B(E_B) \end{aligned}$$

对  $E_B$  求极值, 则有:

$$\begin{aligned} Md'_B(E_B) = C'_B(E_B) & \Rightarrow d'_B(E_B) + md''_B(E_B) \times \frac{\partial E_B}{\partial m} = C'_B(E_B) \times \frac{\partial E_B}{\partial m} \\ & \Rightarrow \frac{\partial E_B}{\partial m} = \frac{d'_B(E_B)}{C'_B(E_B) - mf''_B(E_B)} \end{aligned}$$

$$\because m > 0, d'_B(E_B) > 0, C'_B(E_B) > 0, D''_B(E_B) < 0 \quad \therefore \frac{\partial E_B}{\partial m} > 0$$

即补链企业 B 的创新性努力  $E_B$  随着收益分配系数  $m$  增加而增加。

结论 1: 创新性努力与收益分配成正比。

由于创新性努力大则创新性成本就大, 且创新性努力不易量化, 本文假设投资的大小能够反映创新性成本的大小, 因此有: 投资的大小反映了努力程度。

对于核心企业 A 来说, 有下式成立:

$$Var(w_1) = Var[R - C_A(E_A) - S] = Var[R - C_A(E_A) - S_0 - mR] = (1-m)\sigma^2$$

对于补链企业 B 来说, 有下式成立:

$$Var(w_2) = Var[S - C_{Bp} - C_B(E_B)] = Var[S_0 + mR - C_{Bp} - C_B(E_B)] = m\sigma^2$$

即收益分配系数  $m$  越大, A 承担的风险越小, B 承担的风险越大。

结论 2: 收益分配与承担的风险成正比。

另外, 由于节点企业之间进行副产品或废弃物的交换会产生环境效用, 因此协同收益分配还应与节点企业的生态技术水平和生态贡献有关。

目前的收益文献主要从以下几个角度对共生效益或共生效率进行了研究: 考虑共生效益和共生成本之间的比值、考虑投入和排放量之间的关系以及用 shapley 值方法分配共生能量。从这些研究成果来看, 存在考虑收益分配的影响因素不全面的不足。因此, 本文根据上述定量分析认为, 生态产业链网结构中节点企业的副产品或废弃物的交换, 会给节点企业带来成本的节约或提高经济效益, 也就是说这种交换会增加的协同收益; 生态产业链网结构在发展过程中, 规模会不断扩大, 这就需要节点企业投入资源调整生产, 以适应链网的发展, 显然节点企业的资源投入也会影响协同收益的产生; 另外, 目前研究收益分配的文献

都会涉及到企业承担的风险。本文将影响生态产业链网结构协同收益分配的主要因素归纳为以下 4 种：

#### 1) 生态技术水平

生态产业链网结构最大的特点就是不仅要建立更为密切的产品或服务的关系，而且还要建立副产品及废弃物互换的共生关系，采用清洁生产、梯级利用等生态技术进一步减少链网所产生的废弃物，降低成本，增加收益来源。通过副产品及废弃物互换所产生的协同收益可分为两部分，一部分是节点企业卖出其副产品及废弃物所得收益，另一部分则是企业买入的作为替代原材料的副产品及废弃物与使用常规原材料相比较而产生的成本节约。

#### 2) 生态贡献

生态产业链网结构内节点企业在生产过程中会产生大量的副产品、废弃物，这些副产品、废弃物的利用率也是协同收益分配需要考虑的一个重要因素。节点企业之间通过副产品及废弃物互换建立起协同生产的关系，减少副产品、废弃物的排放量。生态贡献是指节点企业的副产品或废弃物交换的数量与节点企业在自身生产过程中所产生的所有副产品或废弃物的数量的比例。

#### 3) 投入水平

生态产业链网结构内节点企业的工作努力程度也是协同收益分配的一个重要因素。通过对节点企业的努力程度大小进行收益补偿，可以鼓励各节点企业为确保整个生态产业链网结构有效运作做出更多的贡献，进而达到经济、社会、环境共赢的目标。

一般来说，企业的努力水平是不可测的，但是根据一些数据可以反映企业的努力水平。一般情况下，企业的努力水平越高则创新性活动越多，创新性活动越多则创新性投入成本越多。也就是说，这个成本会随着努力程度的提高不断加大，则专业性投资越多。因此本文将节点企业的工作努力程度简化成各节点企业为参与生态协同运作而进行的必要的自身建设。节点企业投入的资源可以分为生产性资源和创新性资源。生产性资源主要包括财力和物力等，创新性资源包括管理经验、知识产权、组织创新等。

#### 4) 承担的风险

在生态产业链网结构运作过程中往往需要节点企业为了整体目标进行一些专用性较高的资产投入，进行内部流程的改进，而且在与其他节点企业在合作的过程中还可能出现其核心优势的外溢，这都使得节点企业未来的收益存在一定的

风险。总的来说,在生态产业链网结构中节点企业所承担的风险主要包括环境风险、市场风险、技术风险、合作风险等。

根据各节点企业的投资额占项目总投资额的比例确定最后的收益分配比例,简单且易于操作,在一些预期收益相对固定、风险相对较小的项目中得到了广泛应用。但是对于投资风险较大的项目来说,则不能仅仅从投资额的大小出发确定收益比例,而需要充分考虑节点企业投资所承担的风险的大小,从而保证能够真正实现“风险分担,收益共享”。

## 2. 模型构建

一般意义上的收益分配是指合作的各个企业从总利润中分得各自应得的份额。对  $n$  个局中人来说,协同收益分配可以看做一个  $n$  维向量  $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , 它需满足下列条件才能产生协同生产关系:

$$\sum X_i = V(M) \text{ 和 } X_i \geq V(i)$$

其中,  $X_i$  即为节点企业  $i$  的收益,  $V(M)$  表示  $n$  个节点企业的总收益,  $V(i)$  为第  $i$  个节点企业不与任何节点企业进行副产品交换时的收益。  $\sum X_i = V(M)$  说明各节点企业分配的收益之和正好是链网结构总的最大收益;  $X_i \geq V(i)$  说明从链网中各自分配得到的收益不小于单独经营所得收益,即必须使每个节点企业都能得到更多的好处。

为了体现生态技术水平、生态贡献、投入水平和承担的风险这四个影响因素与协同收益分配之间成正比的关系,本文提出通过分配因子  $D_i$  来体现出每个节点企业的生态技术水平、生态贡献、投入水平和承担的风险。

各节点企业在实际情况下的谈判地位相差很大,假设每个节点企业的分配因子为  $D_i$ , 分为四部分:生态技术水平  $\alpha_i$ 、生态贡献  $\eta_i$ 、投入水平  $\beta_i$ 、承担风险  $\gamma_i$ ,  $n$  为链网节点企业的数量:

$$D_i = a\alpha_i + b\beta_i + c\eta_i + \left(\gamma_i - \frac{1}{n}\right) \quad (a+b+c=1) \quad (4-31)$$

不失一般性, 设  $a=b=c=1/3$ , 下面说明协同收益分配的设计方法。

### 1) 生态技术水平 $\alpha_i$

生态产业链网结构内副产品及废弃物的交换量决定了交换过程中所获得的协同收益,因此在对这一部分的收益进行分配时,一方面要考虑节点企业采用其他企业的副产品及废弃物作为原料进行生产活动,对于实现生态产业链网结构的排放物减量的高效生产目标所起的至关重要的作用,也就是说,要考虑节点企业对卖入的副产品及废弃物的贡献;另一方面也要考虑到节点企业为了满足以副产

品及废弃物为原料的下游企业的标准要求所进行的技术投入,也就是说要考虑节点企业对卖出的副产品及废弃物的贡献。因此生态技术水平分为买入副产品及废弃物收益的贡献 $\alpha_{i1}$ 和卖出副产品及废弃物收益的贡献 $\alpha_{i2}$ 两部分。

假设生态产业链网结构中的某一生态产业链上买入的副产品和废弃物的种类为 $l$ ,企业 $i$ 买入的副产品及废弃物数量分别为 $q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{il}$ ,这 $w$ 类副产品及废弃物的给企业 $i$ 带来的每单位成本节约值分别为 $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{il}$ ,则对企业 $i$ 来说,买入副产品及废弃物的成本节约值为:

$$V_{i1} = \sum_{j=1}^l q_{ij} \times p_{ij} \quad (i=1,2, \dots, n) \quad (4-32)$$

则企业 $i$ 对生态产业链上买入副产品及废弃物所带来的收益增加的贡献比例为:

$$\alpha_{i1} = \frac{V_{i1}}{\sum_{i=1}^n V_{i1}} \quad (i=1,2, \dots, n) \quad (4-33)$$

设生态产业链网结构中的某一生态产业链上的副产品和废弃物的种类为 $g$ 种,企业 $i$ 提供的副产品及废弃物量分别为分别为 $q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{ig}$ ,这 $g$ 类副产品及废弃物的每单位成本节约值分别为 $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ig}$ ,则对企业 $i$ 来说,卖出副产品及废弃物的成本节约值为:

$$V_{i2} = \sum_{j=1}^g q_{ij} \times p_{ij} \quad (i=1,2, \dots, n) \quad (4-34)$$

企业 $i$ 对生态产业链上卖出副产品及废弃物所带来的收益增加的贡献比例为:

$$\alpha_{i2} = \frac{V_{i2}}{\sum_{i=1}^n V_{i2}} \quad (i=1,2, \dots, n) \quad (4-35)$$

假设买入和卖出副产品及废弃物所带来的收益增加的贡献权重相等,则有

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \alpha_{i1} + \frac{1}{2} \alpha_{i2} \quad (i=1,2, \dots, n) \text{ 成立。}$$

## 2) 生态贡献 $\eta_i$

设生态产业链网结构中的副产品和废弃物的种类为 $f$ 种,节点企业 $i$ 利用的副产品及废弃物的总量分别为 $q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{if}$ ,排放的副产品及废弃物的量分别为 $q'_{i1}, q'_{i2}, \dots, q'_{if}$ ,则对节点企业 $i$ 来说,生态贡献为:

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^f q_{ij}}{\sum_{j=1}^f q_{ij} + \sum_{j=1}^f q'_{ij}} \quad (i=1,2, \dots, n) \quad (4-36)$$

该节点企业  $i$  与其他节点企业相比, 生态贡献的比例为:

$$\eta_i = \frac{L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (i=1,2, \dots, n) \quad (4-37)$$

### 3) 投入水平 $\beta_i$

生态产业链网结构中某个节点企业的投入, 显然会对有链网中其他节点企业的收益产生影响, 因此本文将节点企业对生态产业链网结构目标的贡献大小体现在所投入资源的价值。假设企业  $i$  投入的资源有  $m$  种, 其价值分别为  $r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}$ , 根据所投资的项目对生态产业链目标的贡献大小, 分别给这  $m$  种资源的贡献系数为  $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{im}$ , 那么对于企业  $i$  来说, 投入资源的总价值为:

$$I_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} \times \theta_{ij} \quad (i=1,2, \dots, n) \quad (4-38)$$

则企业  $i$  在资源投入方面所占的分配系数为:

$$\beta_i = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (i=1,2, \dots, n) \quad (4-39)$$

### 4) 承担风险 $\gamma_i$

假设链网的总协同收益为  $U$ , 分配比例为  $D_i$ , 则单个节点企业分得收益为:

$$u(i) = U \times D_i \quad (4-40)$$

这里每个企业承担的风险均为  $1/n$ , 假设实际每个节点企业承担的风险  $\gamma_i$ , 则  $\gamma_i$  与均值风险  $1/n$  的差值为:

$$\Delta R_i = \gamma_i - \frac{1}{n} \quad \left( \sum_{i=1}^n \gamma_i = 1, \sum_{i=1}^n \Delta R_i = 0 \right) \quad (4-41)$$

则节点企业实际收益分配的修正量为:

$$\Delta u(i) = U \times \Delta R_i \quad (4-42)$$

$\Delta u(i)$  可正可负, 根据  $\Delta R_i$  的符合调整。则节点企业  $i$  分得的协同收益为:

$$u(i)' = u(i) + \Delta u(i) = U \times D_i + U \times \Delta R_i = U \times (D_i + \Delta R_i) \quad (4-43)$$

则分配因子为：

$$D_i = \frac{1}{3}\alpha_i + \frac{1}{3}\beta_i + \frac{1}{3}\eta_i + \Delta R_i \quad (4-44)$$

### 4.3.3 应用算例

以蒙西高新技术工业园区中的二氧化碳综合利用生态产业链(如图 4-3 所示)为例,说明协同收益分配率的实际应用。

通过实地调研,获得了蒙西工业园区二氧化碳产业链上副产品及废弃物的利用和排出的基本情况。由于该产业链在实际运行过程之中,一些数据可能存在较大的变动,又由于许多客观原因导致一些数据目前还无法收集。为此,具体数据的确定方法如下:

1. 由于节点企业在生产过程中某些数据存在一定的波动(如产量、价格),因此相关数据大多为一个区间范围。对于这样的数据,在参考专家意见的基础上分别取其均值作为实际参考数据;

2. 对因客观原因无法获得的数据,主要是根据相关节点企业的历史数据或者发展规划中的数据来确定;

3. 对于一些缺乏直接数据的项目,根据园区和节点企业的相关资料进行相应的折算确定。如副产品、废弃物的成本节约,主要根据国家相关政府部门的排污费征收标准管理办法,对相关数据进行合理的估算。

1) 蒙西高新材料股份有限公司,以水泥生产为主,其生产过程副产品及废弃物的利用和排放数据如表 4-2 所示。

表 4-2 高新材料公司数据

项目	品种	数量(万吨/年)	成本节约(万元/万吨)
利用的废弃物	粉煤灰和煤灰水	48	30
	煤矸石	10	8.33
	风积沙	30	3.27
排出的废弃物	窑炉尾气	75	58.7

2) 蒙西纳米材料有限责任公司有两个主营业务,一是从水泥窑炉尾气中筛选生产液态 CO<sub>2</sub>,二是利用液态 CO<sub>2</sub>生产纳米碳酸钙产品,其生产过程副产品及废弃物的利用和排放数据如表 4-3 所示。

表 4-3 纳米材料公司主要生产数据

项目	品种	数量 (万吨/年)	成本节约 (万元/万吨)
利用的废弃物	液态 CO <sub>2</sub>	1.8	58.7
排出的废弃物	石灰石渣	0.42	25

## 3) 可降解塑料项目

以水泥厂窑尾气体排出的 CO<sub>2</sub> 和环氧丙烷为原料, 生产可降解塑料产品, 其生产过程副产品及废弃物的利用和排放数据如表 4-4 所示。

表 4-4 可降解塑料项目主要生产数据

项目	品种	数量 (万吨/年)	成本节约 (万元/万吨)
利用的废弃物	液态 CO <sub>2</sub>	0.2	58.7

该二氧化碳综合利用生态产业链中的三家企业的投资情况如表 4-5 所示, 并根据专家建议, 给出了相应投资对生态产业链网结构目标的贡献系数。

表 4-5 二氧化碳生态产业链中各节点企业的投资情况

项目	投资 (万元)	贡献系数
高新材料项目	48900	0.4
纳米材料项目	9569	0.3
可降解塑料项目	13880.31	0.3

下面具体计算分配因子。

1. 计算生态技术水平  $\alpha_i$ 

根据式 (4-32)、式 (4-33)、式 (4-34) 和式 (4-35), 有:

$$V_{11} = 48 \times 30 + 10 \times 8.33 + 30 \times 3.27 = 1621.4$$

$$V_{12} = 75 \times 58.7 = 4402.5$$

$$V_{21} = 1.8 \times 58.7 = 105.66$$

$$V_{22} = 0.42 \times 25 = 10.5$$

$$V_{31} = 0.2 \times 58.7 = 11.74$$

$$V_{32} = 0$$

则有：

$$\sum_{i=1}^3 V_{i1} = V_{11} + V_{21} + V_{31} = 1621.4 + 105.66 + 11.74 = 1738.8$$

$$\sum_{i=1}^3 V_{i2} = V_{12} + V_{22} + V_{32} = 4402.5 + 10.5 + 0 = 4413$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2} \alpha_{11} + \frac{1}{2} \alpha_{12} = \frac{1}{2} \frac{V_{11}}{\sum_{i=1}^3 V_{i1}} + \frac{1}{2} \frac{V_{12}}{\sum_{i=1}^3 V_{i2}} \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{1621.4}{1738.8} + \frac{1}{2} \times \frac{4402.5}{4413} = \frac{1}{2} \times 0.932 + \frac{1}{2} \times 0.997 = 0.965 \end{aligned}$$

同理，有：

$$\alpha_2 = 0.032$$

$$\alpha_3 = 0.003$$

## 2. 生态贡献 $\eta_i$

根据式（4-36）和式（4-37），有：

$$L_1 = \frac{48 + 10 + 30}{48 + 10 + 30 + 75} = 0.54$$

$$L_2 = \frac{1.8}{1.8 + 0.42} = 0.81$$

$$L_3 = \frac{0.2}{0.2} = 1$$

$$\eta_1 = \frac{0.540}{0.540 + 0.811 + 1} = 0.230$$

$$\eta_1 = \frac{0.811}{0.540 + 0.811 + 1} = 0.345$$

$$\eta_1 = \frac{0.540}{0.540 + 0.811 + 1} = 0.425$$

## 3. 计算投入水平 $\beta_i$

根据式（4-38）和式（4-39），有：

$$I_1 = 48900 \times 0.4 = 19560$$

$$I_2 = 9569 \times 0.3 = 2870.7$$

$$I_3 = 13880.31 \times 0.3 = 4164.093$$

$$\beta_1 = \frac{I_1}{\sum_{i=1}^3 I_i} = \frac{19560}{19560 + 2870.7 + 4164.093} = 0.735$$

$$\beta_2 = 0.108$$

$$\beta_3 = 0.157$$

4. 计算风险调整量  $\Delta R_i (= \gamma_i - \frac{1}{n})$  :

根据式 (4-40), 有:

假设高新材料公司、纳米材料公司和可降解塑料项目的  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  和  $\gamma_3$  分别为 0.20、0.45 和 0.35, 则有:

$$\text{高新材料公司的风险调整量 } \Delta R_1: \Delta R_1 = \gamma_1 - \frac{1}{3} = 0.20 - 0.333 = -0.133$$

$$\text{纳米材料公司的风险调整量 } \Delta R_2: \Delta R_2 = \gamma_2 - \frac{1}{3} = 0.45 - 0.333 = 0.117$$

$$\text{可降解塑料项目的风险调整量 } \Delta R_3: \Delta R_3 = \gamma_3 - \frac{1}{3} = 0.35 - 0.333 = 0.017$$

5. 计算分配因子  $D_i$ :

根据式 (4-31), 有:

$$\text{高新材料公司的分配因子 } D_1: D_1 = \frac{1}{3}\alpha_1 + \frac{1}{3}\beta_1 + \frac{1}{3}\eta_1 + \Delta R_1 = 0.510$$

$$\text{纳米材料公司的分配因子 } D_2: D_2 = \frac{1}{3}\alpha_2 + \frac{1}{3}\beta_2 + \frac{1}{3}\eta_2 + \Delta R_2 = 0.278$$

$$\text{可降解塑料项目的分配因子 } D_3: D_3 = \frac{1}{3}\alpha_3 + \frac{1}{3}\beta_3 + \frac{1}{3}\eta_3 + \Delta R_3 = 0.212$$

#### 4.3.4 结果分析

从理论上来说, 根据节点企业进入链网前后收益的变化或者与同类独立运作企业相比较, 可以获得协同收益的数据。经过实地调研, 获得了蒙西工业园区二氧化碳产业链的经济效益的基本情况, 其中协同收益大约为 12200 万元, 表 4-6 为三家节点企业的具体的协同收益分配方案。

表 4-6 节点企业的协同收益分配方案（千万元）

	高新材料公司	纳米材料公司	可降解塑料项目
分配因子	0.510	0.278	0.212
协同收益分配	6.12	3.33	2.55

从分配因子的结果可以看出，高新材料股份有限公司处于生态产业链的上游并且购入的副产品或废弃物都来自链网外部且资源丰富，相比较而言，相对投资大，且生态技术水平相对较大，尽管面临风险和生态贡献较小，最后的协同收益的分配系数相对最大，基本控制在协同收益一半的水平；可降解塑料项目处于该生态产业链的末端，相对与其他两个企业而言，承担的风险较大并得到风险调整补偿，尽管生态贡献较大，但是生态技术水平最低，因此最后的分配系数相对较小；纳米材料公司投资最小，但是承担的风险最大，因此得到了链网给与的风险调整补偿，最后的收益比例仅高于可降解塑料项目。

#### 4.4 本章小结

从生态产业链网结构的节点企业的立体网络形式探讨了生态产业链网结构内部协同关系，得出节点企业之间的生态协同生产会提高整个链网结构的效率。这些副产品交换等的协同关系使链网结构的整体资源和能力超过各个节点企业的综合，即创造出新增收益。创造性地从协同的角度将协同收益概念引入到生态产业链网结构的研究领域，并探讨了协同收益的主要来源。通过节点企业的进化博弈定量分析了协同收益分配是否公平合理决定了链网演化的稳定和方向。针对现有利益分配方法的局限，建立了包括生态技术水平、生态贡献、投入水平和承担的风险四个主要影响因素的协同收益分配因子，并以蒙西工业园区中的二氧化碳生态产业链为例，探讨了该分配因子的实际应用。

## 第五章 生态产业链网结构有序的影响因素及其测算研究

生态产业链网结构的运行问题不仅与自身的结构、功能有关,而且与外界干扰的强度和特征有关。这些干扰因素对链网运行的干扰会影响经济、环境及社会效益。目前有众多学者从不同的角度针对生态产业链网结构的稳定性问题展开研究,其中有些文献对国内外的实际案例进行研究,提出了许多影响生态产业链网结构稳定性的因素,但是将链网作为一个耗散结构来深入研究的文献相对较少。耗散结构理论认为,系统在演化过程中有内在和外在这两类因素,会影响到系统的正常运转。本章将有序这个概念引入到生态产业链网结构的研究领域,分析了影响生态产业链网结构有序运行的影响因素,采用投入产出方法从定量的角度探讨了生态产业链网结构在受到市场需求波动的影响下,能够调整内部的生产适应环境的变化。生态产业链网结构受到内在和外在这类因素影响时会表现出两个趋势:有序运动和无序运动。针对这种情况,提出了生态产业链网结构有序的测算方法,从结构和功能两个方面构建了结构熵和功能熵,定量测算生态产业链网结构的有序程度,并进行了实证研究。

### 5.1 生态产业链网结构有序问题的提出

#### 5.1.1 生态产业链网结构涨落的两种趋势

系统演化过程中一方面运用自我纠正的负反馈达到自我保持的过程,另一方面运用自我放大的正反馈手段达到自我创新的过程。这些运动和变化总会使系统的任何给定状态经受不同程度的局部扰动,也就是导致涨落的产生,涨落主要表现为对系统宏观量的偏离。

从微观来说,生态产业链网结构中不同的节点企业作为有限理性的经济主体,追求自身利益的最大化,在协同生产的过程中存在着相互促进、相互制约的反馈机制。在不同的发展阶段,其演化轨迹都会千差万别、多种多样。从宏观上来看,链网的演化表现出两种趋势:一种是自发倾向于无规则的无序运动,节点企业之间相互制约的作用大于相互促进的作用,导致生态产业链网结构的整体功能小于节点企业的功能之和,这是链网最终走向衰落和瓦解的重要原因;另一种是由节点企业之间的相互关联所引起的协同运动,节点企业之间相互促进的作用大于相互制约的作用,使生态产业链网结构的整体功能大于节点企业的功能之和,这种运动是链网自发走向有序的重要原因。

序是指系统组成要素之间的相互联系,以及这种联系在时空结构和功能结构中的表现。无序是指系统组成要素之间的无规则的联系和转化,如一盘散沙,就是一种无序状态;有序是指系统组成要素之间有规则的联系或转化,如行星绕着恒星有规则的运动就是一种有序状态。一个系统的有序程度即包括系统内部各要素之间关联的多少和强度,又包括系统与外部的关联和强度,

序<sup>[110]</sup>包括结构序和功能序。结构序是标志系统结构的规则性和顺序性的,表示了系统内部各要素相互联系和作用的方式,又分为时间序和空间序。时间序是指系统在发展变化时,时间上先后或同时的秩序,即确定而有规则的进程。空间序是指系统在空间分布的规则,即按照一定的方式排列和结合的空间分布。功能序是指系统与外部环境相互联系和作用过程的秩序和能力,体现了系统与外部环境之间的物质、能量和信息的输入输出的变换关系。对于生态产业链网结构来说,结构序是指链网的结构,其中时间序是指节点企业之间物质、能量和信息的流通,尤其是副产品或废弃物的交换关系,空间序是指任一节点企业与上游和下游企业链接的数量。

生态产业链网结构是自发地发生从无序到有序还是从有序到无序演变,主要取决于链网中哪一种运动趋势占据主导地位。由此链网的演化结果将具有多种可能性。对有人参与的生态产业链网结构来说,当各种扰动影响其正常运行时,可以人为地利用或促进某些涨落,使链网按照人的目的演化。例如,生态产业链网结构作为开放系统,依赖于环境而存在,要在物质和能量的不断流动中才能保持运行,当系统边界的输入输出变化时,通过调整内部的各种流的流动来适应环境的变化;当内部节点企业的生产规模出现变化时,可以通过局部调整相互链接关系,保证整个链网的正常生产。

生态产业链网结构在本质上是一个非线性系统,内部的节点企业具有不同的经济利益,它们将从“经济人”视角出发来追求自身利益的最大化,因此技术、知识、政策、管理等很多方面会导致节点企业出现变化,比如先进技术的出现,新的融资渠道的出现,新的专业人才的出现等,而这些因素的变化都会使链网结构产生涨落。由于链网失稳或局部范围不稳定的涨落运动,和各节点企业的局部藕合关系及运动特性相联系的模式或参量不断变化,使各种变量的涨落此起彼伏。同时限于自身在资源和能力等方面的局限性,它们之间在某些领域又存在着紧密的合作关系,这样必然会导致它们彼此之间的沟通和协调,而它们沟通和协调的方式又会因节点企业自身目标和环境的变迁而处于不断的适应与调整过程之中。

### 5.1.2 生态产业链网结构有序的概念

作为开放性的复杂系统,生态产业链网结构在发展演化的过程中,通过多个企业协同生产过程(原材料采购和生产、产品制造、(副)产品使用、副产品的回用和最终处置等环节),向社会向链网外提供产品或服务,不断与外界环境之间进行着物质、能量和信息的交换。因此生态产业链网结构与内外部环境的协调性主要体现在自身的有序性。

生态产业链网结构的有序是指生态产业链网结构逐步向更合理和更高级的方向发展,前者是指各个节点企业之间的生产链接关系使资源配置更有效,后者是指生态产业链网结构整体效率和功能从低水平向高水平发展。当内部的构成要素发生改变以及外部环境发生变化时,作为一个完整的生态系统,整个运行机制即使会暂时出现某种波动,通过良性的自我调整最终也会趋于平稳的协调发展。从宏观上来说,生态产业链网结构作为一个动态的、开放的、复杂的系统,其有序是在不断自我更新的发展运动过程中实现的,呈现出动态发展的趋势。具体表现为以下特征:

#### 1. 整体绩效不断提高或维持不变

这是生态产业链网结构中节点企业之间协同生产的基础和目的所在,各节点企业最大限度地发挥各自的优势,从而使链网高效率地运行并创造最大效益。如果整体绩效不断下降,那么节点企业间的合作生产的关系就失去了存在的必要性,

#### 2. 宏观的节点企业链接关系不间断

整个生态产业链网结构的生产环节不会出现长期的供应短缺、生产的延误或断裂等问题,也就是说,即使链网内的产业链条受到上述问题的影响需要作出相应的调整或改变,但是从宏观上来说生产过程保持不间断。

#### 3. 生态产业链网结构能适应内外环境的变化

生态产业链网结构是一个动态、开放的系统,当外部环境出现不同程度的变动时,节点企业会在协同生产的状态中不断调整相互之间的关系,能更好地适应相互之间的变化,保持结构的相对稳定,不会产生“质”的变化。

总的来说,生存的外部环境的变化以及内部节点企业的生产调整都会对链网产生积极或消极的各种影响,生态产业链网结构的有序表现在当内、外部环境出现不同程度的变动时,面对某些消极的因素链网有一定的环境适应性,节点企业之间能持续地实现经济效益和环境效益“双赢”。也就是说,生态产业链网结构

对环境变化迅速做出反应并产生最佳对策，或者维持原有的协同状态，或者演化到一个新的更有序的状态，从而实现其平稳发展。

## 5.2 生态产业链网结构有序的影响因素和控制分析

### 5.2.1 生态产业链网结构有序的影响因素

系统与外界环境相互协调促进自身的发展，但是演化的途径通常不止一个，究竟哪一个成为现实，即取决于系统内部子系统的相互作用，同时也取决于一定的外部环境。因此系统演化发展过程中的影响因素有两个来源：从变化的环境中来或从系统内部自发地产生，同样地，生态产业链网结构的运行发展同样会受到外在因素和内在因素的影响。

由于生态产业链网结构处于竞争、合作的复杂多变的 market 环境中，将不可避免地要面对许多不确定的因素，如制度环境、政策环境、文化环境、技术与服务环境等方面所具有的时变性和不可预测性，会不同程度的对生态产业链网结构产生扰动。这种扰动会对节点企业的生产经营活动产生影响，刺激节点企业根据自身的目标和利益重构与链网内其他企业之间的结构关系和联系方式。

此外，由于生态产业链网结构是由相互协同的经济实体链接组成的生产系统，链网中的节点企业都是相互独立的经营主体，都有各自独立的目标和使命，节点企业之间的相互信任程度、协同生产的密切程度、信息共享的程度、分配的公平程度等都会导致节点企业出现变化，影响到生态产业链网结构整体的生产运作。

根据上述分析，构建生态产业链网结构运行影响因素的示意图，如图 5-1 所示。

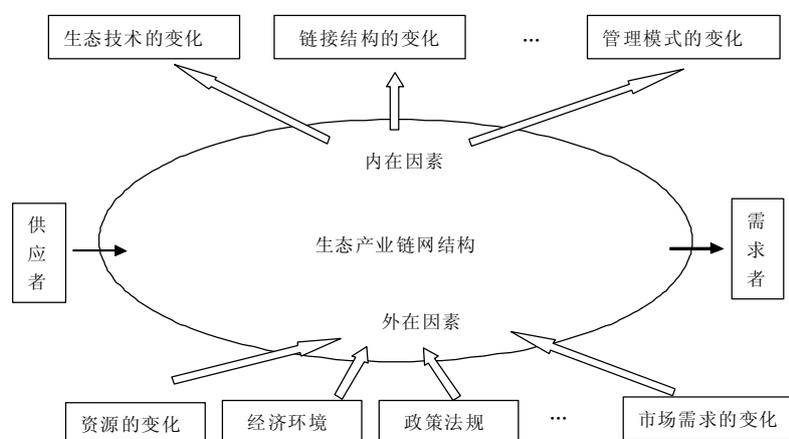


图 5-1 生态产业链网结构运行影响因素的示意图

### 1. 外在影响因素

生态产业链网结构在发展过程中会受到环境的扰动,这些环境影响因素可以从市场需求、所在区域的自然资源条件以及政府行为和公众对于环境问题的认知等几个方面来进行分析。

#### 1) 市场需求因素

生态产业链网结构存在的关键条件之一就是能否及时的满足市场的需求,并获得较好的经济效益。当生产需求较大并且需求量比较稳定时,产品销售情况就会较好,也就是说产品基本不存在滞销或销售不出去的情况。在这种情况下,生态产业链网结构有序运行不会受到市场需求的影响,但是市场需求波动是不可避免的。随着行业分工的细化水平的提高,使得产品种类的越来越多样化,同时经济环境中产业结构不断的变化,对于产品需求的种类和数量都会出现波动,节点企业之间的协同生产会受到影响,最终使资源得不到有效配置,从而生态产业链网结构的有序运行会受到干扰和阻碍。因此,当市场需求出现波动时,生态产业链网结构及时调整内部的生产规模,是保证其有序运行的关键所在。

#### 2) 自然资源条件

自然资源条件包含了地理位置、气候条件、自然资源蕴藏等方面的情况。由于不同地区的自然资源蕴藏存在着很大的差异,目前多数生产活动都是需要有一定的自然资源来支撑的。自然资源蕴藏不断变化的性质,使其对生态产业链网结构的影响是动态变化的。当该区域某种自然资源的减少,对该种资源具有依赖性的产业会相应地做出较大的调整,这对于链网结构的有序运行的影响极有可能会是毁灭性的。

#### 3) 政府宏观政策

政府的行为策略除了要保证政治利益和财政收入以衡量自身行为绩效之外,政府根据本地的各产业也必将并做出相应的政策调整。这就是说,政府对生态类产业的管制力度、重视程度,甚至是倾斜政策和优惠政策的实施力度,对生态产业链网结构的运行和发展会产生直接影响,因此有针对性的相关政策,对链网的有序运行会产生一定的积极作用。

#### 4) 公众对于环境问题的认知

随着公众对于环境问题的认知的加强,企业的环境形象越来越受到人们的关注。尽管较多的公众对于环境问题的认识模糊,甚至简单地等同于“环境污染”。

但是，公众对负面环境问题的敏感程度和关注程度远高于其他正面环境问题。因此，由于公众对负面环境问题关注程度的日益提高，容易造成对链网的环境绩效形成一个目标期望值，如果由于其中某些薄弱环节的失效而导致整体出现暂时的或是一段时间内的环境绩效下降，将会使链网在公众心目中的环境形象随之降低，影响链网有序运行的正常发展。

## 2. 内在影响因素

在生态产业链网结构中，各节点企业之间的联系广泛而密切，构成了一个网络。因此每个节点企业的变化都会受到其它节点企业变化的影响，同时有会引起其它企业的变化。这必然导致生态产业链网结构在发展过程中由于受到节点企业的产能调整和产品的改良等方面的影响，内部结构也会发生变化，这些影响因素可以从生态技术体系、节点企业间的链接结构以及整个链网结构的管理模式等几个方面来进行分析。

### 1) 生态技术因素

在生态产业链网结构从构建到发展的整个过程中，产品的生产技术和副产品循环使用技术体系都是起到决定性作用的因素。科技的进步无疑将会提高原材料和剩余物的利用率。一旦出现科技的进步和某一产业生产工艺的改进甚至科技革命，而如果生态产业链网结构中相关节点企业没有发生相应的变革，那么整个链网赖以生存的优势将荡然无存，生态产业链网结构就会失去了存在的价值。

如果某些节点企业存在技术存量以及技术创新方面的不足，导致吸收副产品或者废弃物的能力有限，因此与其有生态协同关系中的企业多会选择其它已经具备该先进技术的外部企业来建立新的生态协同关系。这样当生态产业链网结构的稳定性不强时，会因其中某一个环节缺失而使整个链环断裂，对生态产业链网结构的有序运行产生重大影响。

### 2) 链接结构因素

在内部，一方面节点企业为了求得自身的发展需要在技术等各方面进行创新，地理位置的邻近可以促进创新性的知识在链网内企业间的扩散和共享；另一方面为求得协同效益，它们之间需要实行高度的分工协作，以提高生产效率，降低空间交易成本。但是以环境绩效和经济绩效目标为出发点的节点企业，经济利益通常并不一致，合作和互动是自愿的甚至是自发的，企业之间相互作用的形式与其链接的方式相对应，如图 5-2 所示<sup>[101]</sup>的一对一、一对多、多对一和混合的多种纵向、横向关系复杂的链接形式。如果在这种复杂的链接形式中节点企业生态

协同关系越强，链网成长过程就越稳定。相反，生态协同关系越弱，链网成长过程的稳定性也就越低。

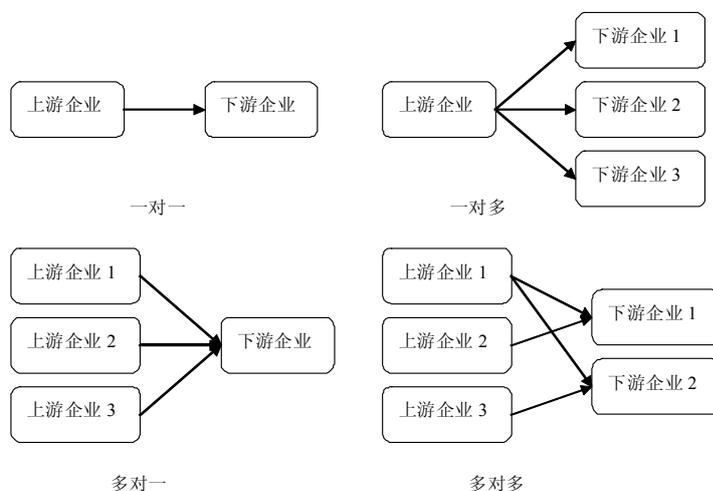


图 5-2 补链企业的链接形式

### 3) 管理模式因素

链网中的节点企业之间存在着多种特定关系：一方面，它们在资源、技术和能力上存在着互补，要通过专业化的分工和协作来获取外部经济效应；另一方面，它们一般要通过交换来获取各自的资源和副产品，并促进知识和技术的尽快积累。它们互相依存和配合，结成具有一定共同利益的协作体系。同时它们又是各自独立的产权主体，保持着各自的所有制、隶属关系和投资渠道，实行独立核算，互相之间的联系以市场为纽带，不同于企业内的分工协作关系。因此要使生态产业链网结构成为一个有着高效的物质、能量和信息流动的整体，从整体上把握和调整各个成员的需求和供给状况的适宜管理模式，才能实现资源的有效且合理分配，从而保证生态产业链网结构的有序运行。

通过上述的分析可以看出，上述众多因素决定了生态产业链网结构的发展过程并不是一帆风顺的。如果说链网有效的协同生产是促使其稳定发展的前提基础，那么链网良好的内部结构和对内外噪声动态的适应或抗干扰能力是其可持续发展的有力保障。因此，生态产业链网结构作为有人参与的系统，可以通过建立适应或抗干扰的机制，以保证有序状态。下面就以市场需求波动为例，分析减少各种干扰因素的影响。

## 5.2.2 市场需求变动下的反馈控制模型

生态产业链网结构作为复杂系统，表现为多重反馈、节点企业种类繁多和结构复杂。因此，很难从最基本的节点企业开始进行分析，本章按照功能、结构特

点,不侧重其内部结构的分析,而是将具有共同属性的节点企业归为同一子系统,以形成高一层次的子系统,仅仅侧重对子系统的输入、输出特性进行研究,该子系统的状态或输出变量可作为整个链网的一个或一组参数。那么尽管子系统之间存在着各种关联和反馈关系,但是其他子系统来说某一子系统具有相对独立性。

这里把链网作为一个整体进行设计,采取了略去结构的微观细节,主要用一定近似程度的仿真模型考虑子系统之间物质流、能量流和信息流的交换。分析在生态产业链网结构中物质与能量的流动,包括从物质的提取生产、消费和最终处置等运行过程以及如何减少各种干扰因素对这些过程的影响。

二十世纪三十年代由经济学家 Wassily. W. Lesntief 在美国首次提出投入产出理论,经过几十年的发展。该理论得到了迅速的推广和运用。投入产出技术是研究资源合理配置的一种方法,在研究资源、环境等方面也得到了较大的发展和应用。

本文在使用投入产出方法<sup>[166]</sup>来分析问题时,将投入分为中间产品投入和循环产品投入。如产品生产的投入分为中间产品投入、循环所得产品投入、各子系统产品生产中产生的废弃物。所产生的全部副产品和废弃物有一部分经过处理减少最终污染,另一部分可以回收利用的副产品进入循环生产部门,生产出一定数量的可再利用的产品,即再循环产品。这部分再循环产品将会和最初的产品一样在各子系统之间分配,进行新一轮的生产和消耗,如此反复循环,最终剩下的是完全不可利用的废弃物。因此,投入产出分析方法可以追踪直接和间接物质流的路径,本章将以投入产出方法为基础建立仿真模型。

### 1. 投入产出矩阵

投入产出分析方法主要是建立时间上某一时点的经济系统的稳定流(物质流)模型而不考虑它们之间经济的相互作用关系。通过物质流系统和相应的物质流矩阵,追踪直接流和间接流的路径。

这里从生态的角度来建立投入产出模型,主要考虑链网中的物质流(理论上,这种方法可以同样的运用于能量流)。

如图 5-3 所示的一个链网结构,其中,

$R_i$ : 第  $i$  过程;

$I_i$ : 从系统外输入第  $i$  过程的输入流(每单位时间的物质或能量);

$O_i$ : 从第  $i$  过程输出到系统外的输出流(每单位时间的物质或能量);

$f_{ij}$ : 从第  $j$  过程流向第  $i$  过程的中间流(每单位时间的物质或能量);

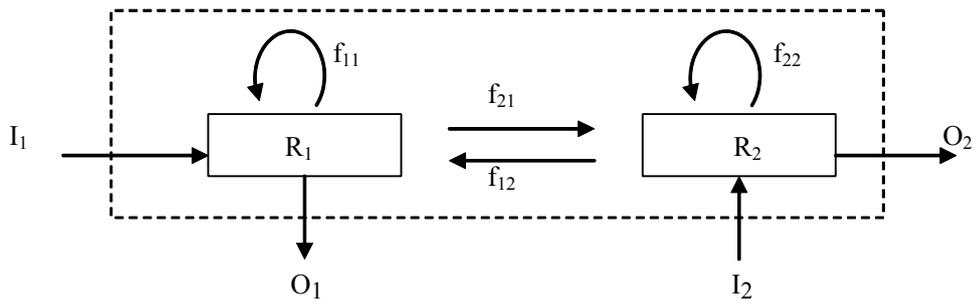


图 5-3 投入产出流示例

由此，可以给出系统的投入产出矩阵  $P$ ，见表 5-1，这里的投入产出矩阵  $P$  是一个  $2n \times 2n$  的矩阵， $n$  是生态产业链网结构的过程数。

表 5-1 投入产出矩阵  $P$

	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	...	R <sub>n</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	...	I <sub>n</sub>
R <sub>1</sub>	$f_{11}$	$f_{12}$	...	$f_{1n}$	$I_1$	0	...	0
R <sub>2</sub>	$f_{21}$	$f_{22}$	...	$f_{2n}$	0	$I_2$	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...
R <sub>n</sub>	$f_{n1}$	$f_{n2}$	...	$f_{nn}$	0	0	...	$I_n$
O <sub>1</sub>	$O_1$	0	...	0	⋮			
O <sub>2</sub>	0	$O_2$	...	0				
...	...	...	...	...				
O <sub>n</sub>	0	0	...	$O_n$				

根据物质守恒定律，用  $P$  建立系统的平衡流（即输入流=输出流），通过  $R_i$  的总流量被定义为  $T_k$ ，则有

$$T_k = \sum_{j=1}^n f_{kj} + I_k \quad k=1, 2, \dots, n \quad (5-1)$$

$$T_k = \sum_{i=1}^n f_{ik} + O_k \quad k=1, 2, \dots, n \quad (5-2)$$

式 (5-1) 中，把流入  $R_i$  的所有输入流相加，在 (5-2) 中，把所有从这个过程输出的流相加，显然，有下式成立：

$$\sum_{j=1}^n f_{kj} + I_k = \sum_{i=1}^n f_{ik} + O_k \quad k=1, 2, \dots, n$$

也就是说投入产出矩阵  $P$  的每行元素之和等于  $P$  的每列元素之和。投入产出分析方法考虑到系统中的直接流和间接流之间的关系，因此可以计算出链网中的总流

量通过  $R_i$  的比例。若利用式 (5-1)，这个比例指的是建立在输入流上的比例；若利用式 (5-2)，则这个比例指的是建立在输出流的比例。

## 2. 建立投入产出模型

用  $b_{ik}$  表示从第  $k$  个过程流向第  $i$  过程的流占第  $i$  过程的总流量  $T_i$  的比例，则有

$$f_{ik} = b_{ik} \times T_i \quad i, k=1, 2, \dots, n \quad (5-3)$$

把 (5-3) 代入 (5-2) 则

$$T_k = \sum_{i=1}^n b_{ik} \times T_i + O_k \quad i, k=1, 2, \dots, n \quad (5-4)$$

把 (5-4) 转化为矩阵形式：

$$T = B'T + O \quad (5.5)$$

其中，

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad 0 \leq b_{ij} < 1, 0 < \sum_{j=1}^n b_{ij} < 1。$$

这里  $B$  称为生态产业链网结构的过程流系数矩阵。

由 (5-5) 可得：

$$T = (I - B')^{-1} \times O = (I - B)^{-1} \times O = N \times O \quad (5-6)$$

$N$  代表组成链网的  $R_i$  的所有直接和间接关系，称为生态产业链网结构的结构矩阵。

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^l (B)^k = I + B + B^2 + \cdots + B^k + \cdots = (I - B)^{-1} = N \quad (5-7)$$

这里  $B_k$  表示链网内路径长度为  $k$  的所有流的集合（从一个过程到另一个过程的直接流的长度为 1，通过一个中间过程的间接流的长度为 2 等）。在这个数列中的第一项是单位阵，代表链网中所有最初流； $B$  表示所有的直接流， $B^2$  表示长度为 2 的所有间接流，无穷长度的间接流是无穷项。因此，(5-7) 中的所有项的和表示所有的直接流和间接流，用  $N$  表示，通过  $N$  所有过程  $R_i$  的相关关系都会被综合考虑。

### 5.2.3 应用算例

如图 5-4 所示，有 3 个过程，其中  $R_1$  表示生态产业链网结构中正产品总的生产， $R_2$  表示表示生态产业链网结构中正产品总的消费； $R_3$  表示生产和消费中可回收副产品的再还原，链网中的单位为万吨/年。其中：

输入流：

$I_1=110.5$ ：表示生产正产品的原材料；

$I_2=5$ ：表示从链网外进口的作为消费的正产品；

$I_3=5$ ：表示从链网外输入的作为回收副产品生产的原材料；

中间流：

$f_{11}=12$ ：表示正产品生产中实施清洁生产回收得到的原材料；

$f_{12}=10$ ：表示回收正产品的二次生产；

$f_{21}=30.5$ ：表示输出给消费过程的正产品；

$f_{31}=20$ ：表示正产品生产中可回收的副产品；

$f_{32}=12.5$ ：表示正产品消费中可回收的副产品；

$f_{33}=3$ ：表示副产品还原生产中实施清洁生产回收得到的原材料；

输出流：

$O_1=70$ ：表示正产品的输出；

$O_2=13$ ：表示消费正产品后产生的不可回收的废物的丢失的输出；

$O_3=37.5$ ：表示副产品的输出。

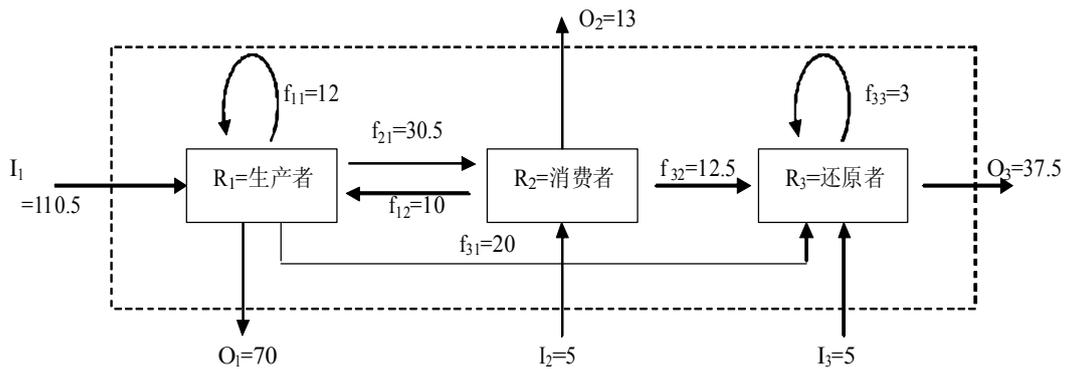


图 5-4 生态产业链网结构的物质流简化图

这样的一个生态产业链网结构的投入产出矩阵  $P$  如表 5-2。

表 5-2 投入产出矩阵 P

P	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>
R <sub>1</sub>	12	10	0	110.5	0	0
R <sub>2</sub>	30.5	0	0	0	5	0
R <sub>3</sub>	20	12.5	3	0	0	5
O <sub>1</sub>	70	0	0	0		
O <sub>2</sub>	0	13	0			
O <sub>3</sub>	0	0	37.5			

按照上面提出的投入产生方法，计算出这个生态产业链网结构的过程流系数矩阵 B，如表 5-3。从这个矩阵可以看出，进入 R<sub>1</sub> 的流 9.1% 来自 f<sub>11</sub>，7.5% 来自于 f<sub>12</sub>，因此有 83.4% 来自于 I<sub>1</sub>；进入 R<sub>2</sub> 的流 85.9% 来自于 f<sub>21</sub>，因此 14.1% 来自于 I<sub>2</sub>；进入 R<sub>3</sub> 的流 49.4% 来自于 f<sub>31</sub>，30.9% 来自于 f<sub>32</sub>，7.4% 来自于 f<sub>33</sub>，因此有 12.3% 来自于 I<sub>3</sub>，通过计算该链网的过程流矩阵 N 如表 5-4 所示。

表 5-3 过程流矩阵 B

B	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>
R <sub>1</sub>	0.091	0.075	0.000
R <sub>2</sub>	0.859	0.000	0.000
R <sub>3</sub>	0.494	0.309	0.074

表 5-4 结构系数矩阵 N

N	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>
R <sub>1</sub>	1.184	0.089	0.000
R <sub>2</sub>	1.017	1.077	0.000
R <sub>3</sub>	0.971	0.407	1.080

假设这个生态产业链网结构的生态状态很稳定，在一定时间内保持不变。假设第二年市场需求出现了波动，则输出流的流量需要进行一些调整。假设正产品的需求增加 20%，即 O<sub>1</sub>=84 万吨/年；同时，由于技术改造，不可回收的废弃物降低 10%，即 O<sub>2</sub>=11.7 万吨/年；副产品的输出不变，O<sub>3</sub>=37.5 万吨/年，由 (5.5) 可知：

$$T = (1 - B)^{-1} \times O = N' \times O$$

$$= \begin{bmatrix} 1.184 & 0.089 & 0 \\ 1.017 & 1.077 & 0 \\ 0.971 & 0.407 & 1.080 \end{bmatrix}' \times \begin{bmatrix} 84 \\ 11.70 \\ 37.5 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 147.754 \\ 35.351 \\ 40.500 \end{bmatrix}$$

假设过程流系数矩阵  $B$  不变，同时根据  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的实际生产能力和外部原材料的供应情况，调整输入流和中间流，从而得到新的投入产出矩阵  $P$ ，如表 5-5 所示，相应设计的生态产业链网结构如图 5-5 所示。

表 5-5 投入产出矩阵  $P$

P	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>
R <sub>1</sub>	13.38	11.15	0.00	123.22	0.00	0.00
R <sub>2</sub>	30.37	0.00	0.00	0.00	4.98	0.00
R <sub>3</sub>	20	12.5	3	0	0	5
O <sub>1</sub>	84	0	0			
O <sub>2</sub>	0	11.7	0		0	
O <sub>3</sub>	0	0	37.5			

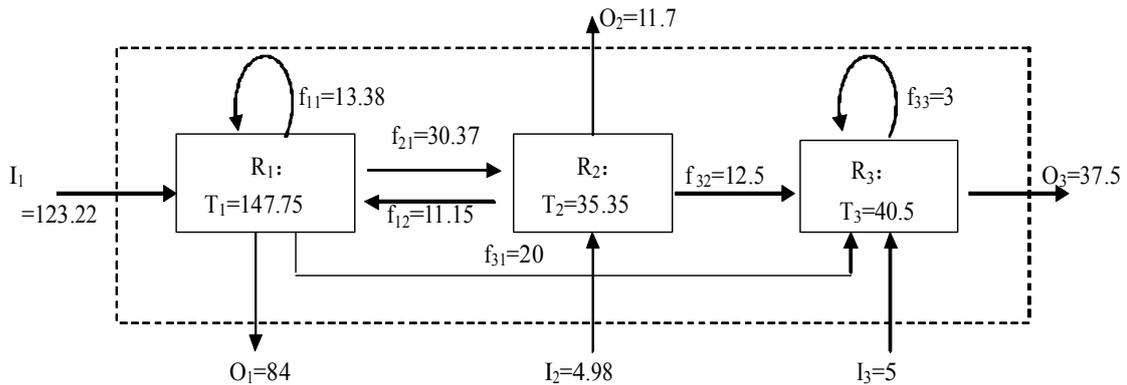


图 5-5 市场需求变动后的生态产业链网结构的物质流简化图

### 5.2.4 结果分析

从图 5-4 和图 5-5 对比来看，在输出流出现变化的情况下，生态产业链网结构能较好的调整输入流和中间流，输出流即满足了市场的需求，又实现了链网的供求的平衡，使整个链网的生产、消费和还原过程保持在一个相当稳定的协同发展状态。

生态产业链网结构作为一个开放系统，在发展的每一个阶段，都需要面对外部环境的约束问题，要维持自身的存在与发展，链网作为一个整体必须具备及时反应和适应外部环境变化的能力。与自然生态系统不同的是，生态产业链网结构

在人为的影响下，将环境的变化反馈到链网内部，通过相互作用和协同形成一定的秩序来适应环境，并增强了链网学习和适应环境的能力。

### 5.3 生态产业链网结构有序的测算模型

起源于物理学的熵概念已经从单纯描述微观世界的领域扩展到自然科学和社会科学领域，也由最初描述事物的无效性和混乱程度发展到度量不确定性的多少，并且人们用信息熵来度量系统的无序（或有序）程度。本文用熵这个宏观的概念，作为生态产业链网结构整体有序的衡量尺度。根据前文的分析已经得出，节点企业之间相互作用、协同生产，但是生态产业链网结构作为一个人工系统，对应于一个特定的宏观结构，微观结构状态存在多种可能，也就是说具有不确定性，本文用“结构熵”来描述这种不确定性的大小。同时，在生态产业链网结构既定的情况下，由于受到内外环境的影响，即使节点企业分工明确，链网的运行也具有不确定性，也就是说，确定的结构也可能对应许多不同的运行状态，本文用“功能熵”来描述运行状态的健康程度。

#### 5.3.1 结构熵的测算

在研究生态产业链网结构时，需要考虑两种重要链接关系：

一是节点企业链接的深度。任意两个节点企业进行产品交换，相互之间就存在生态产业链条。当进行直接链接时，链条的长度最短；当出现间接链接时，就需要通过其他节点企业进行传递。一般情况下，链条越长，副产品或废弃物利用效果越好，效益越高。

二是节点企业之间链接跨度。是指在满足一定链接深度的情况下，任何一个节点企业与其他节点企业链接的数量。一般情况下，链接跨度越大，资源配置空间越大，配置效率越高，抗干扰能力越强。

在生态产业链网结构中，物质、能量和信息在节点企业之间有序流动，维持着链网的正常运转。在节点企业数量不变的情况下，生态产业链网结构仅由节点企业的链接方式决定。各种资源的产出效益在很大程度上取决于结构状态，如果结构扭曲且呈刚性，大量资源得不到及时有效配置，即使短期内尚有可能出现经济增长，但从长期来看会因结构的制约而陷入困境。

因此，可以从时效（链接深度）和质量（链接跨度）两个层面定义生态产业链网结构的有序性。时效是资源利用效果的度量，质量是资源利用效率的度量。本文用信息熵表征节点企业链接的多样性。生态产业链网结构内节点企业之间的配置效率和配置效果越好，节点企业链接的多样性程度越高，其熵值越小，生态

产业链网结构有序程度越高,反之亦然。可用下式测算生态产业链网结构的有序性:

$$R = \alpha R_1 + \beta R_2 \quad (5-8)$$

式中,  $R_1$ 、 $R_2$  分别代表时效和质量,  $\alpha$ 、 $\beta$  是时效和质量关于生态产业链网结构的权重系数。

### 1. 节点企业链接的时效测算

时效<sup>[172]</sup>是物质、能量和信息等在节点企业之间配置效果的度量; 时效熵用来反映生态产业链网结构时效的不确定性大小。任意两个节点企业之间链接的时效熵定义为(对数计算以 2 为底):

$$H_1(i, j) = -P_1(i, j) \times \log_2 P_1(i, j) \quad (5-9)$$

式中,  $P_1(i, j)$  为链网中第  $i$ ,  $j$  个节点企业链接的时效微观状态实现概率, 可用下式计算:

$$P_1(i, j) = \frac{L_{ij}}{A_1} \quad (5-10)$$

其中,  $L_{ij}$  为两个节点企业间的链接长度, 是指两节点企业间的最短路径。直接链接的长度为 1, 每中转一次长度加 1。根据生态产业链网结构实际运行的结构状态, 可用确定各上下层节点企业间链接的最短长度  $L_{ij}$  ( $i, j$  表示节点企业的编号)。由此可确定链网结构的时效微观状态总数  $A_1$  为:

$$A_1 = \sum_i \sum_j L_{ij} \quad (5-11)$$

生态产业链网结构的总时效熵  $H_1$  定义为:

$$H_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H_1(i, j) \quad (5-12)$$

其中,  $n$  为生态产业链网结构中各层次节点企业按序次编号的总数。

生态产业链网结构的最大时效熵定义为  $H_{1m}$ :

$$H_{1m} = \log_2 A_1 \quad (5-13)$$

由此可以计算出生态产业链网结构的时效  $R_1$ , 时效  $R_1$  越小, 说明资源配置效果越好。

$$R_1 = 1 - \frac{H_1}{H_{1m}} \quad R_1 \in [0, 1] \quad (5-14)$$

### 2. 节点企业链接的质量测算

质量<sup>[172]</sup>是物质、能量和信息在生态产业链网结构中配置效率的度量, 质量

熵用来反映生态产业链网结构质量不确定性的。某一节点企业的质量熵定义为：

$$H_2(i) = -P_2(i) \times \log_2 P_2(i) \quad (5-15)$$

式中， $P_2(i)$  为第  $i$  个节点企业的质量微观态实现概率，可用下式计算：

$$P_2(i) = \frac{M_i}{A_2} \quad (5-16)$$

其中， $M_i$  为节点企业链接跨度，是指生态产业链网结构中与该节点企业有直接链接关系的节点企业数量，根据生态产业链网结构实际运行的结构状态，可以确定各节点企业的链接跨度  $M_i$ （其中  $i$  表示节点企业的编号， $i=1, 2, \dots, n$ ）。计算生态产业链网结构的质量微观状态总数为：

$$A_2 = \sum_{i=1}^n M_i \quad (5-17)$$

计算生态产业链网结构的总质量熵为：

$$H_2 = \sum_{i=1}^n H_2(i) \quad (5-18)$$

计算生态产业链网结构的最大质量熵为：

$$H_{2m} = \log_2 A_2 \quad (5-19)$$

由此可以计算生态产业链网结构的质量  $R_2$ ，质量  $R_2$  越低，说明资源配置效率越高。

$$R_2 = 1 - \frac{H_2}{H_{2m}} \quad R_2 \in [0, 1] \quad (5-20)$$

这样利用结构熵模型，就能够测算生态产业链网结构的有序度。

### 5.3.2 功能熵的测算

信息熵作为系统状态不确定性的一种度量，熵值越大，状态的不确定性也就越大。为客观描述生态产业链网结构运行的健康和活跃程度，在本文中借助信息熵的性质，构造了评价模型，对生态产业链网结构运行功能进行分析。

假如考虑一个生态产业链网结构的运行评估问题，有  $m$  个评估指标， $n$  个评价对象，建立指标评价矩阵为  $B'$ ：

$$B' = \begin{bmatrix} b'_{11} & b'_{12} & \cdots & b'_{1n} \\ b'_{21} & b'_{22} & \cdots & b'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b'_{m1} & b'_{m2} & \cdots & b'_{mn} \end{bmatrix} \quad (5-21)$$

生态产业链网结构的运行效果,显然属于已发生的时间序列“事态”,根据熵的性质,对多目标方案进行评价时,指标体系不应该是严格意义上的时间增函数,而必须选取具有横向可比性的相对性参数,否则,评价结果永远是后发生的“事态”优于先发生的“事态”,评价将失去意义。

对  $B$  做标准化处理得到:

$$B = (b_{ij})_{m \times n}$$

式中,  $b_{ij}$  是第  $j$  个评价对象在指标  $i$  上的值, 有  $b_{ij} \in [0, 1]$ , 且,

$$b'_{ij} = \begin{cases} \frac{b_{ij}}{\max_j \{b_{ij}\}} & b_{ij} \in D_1 \\ \frac{\min_j \{b_{ij}\}}{b_{ij}} & b_{ij} \in D_2 \end{cases} \quad (5-22)$$

其中,  $D_1$  是收益性指标, 相对最值越大越好;  $D_2$  是成本性指标, 相对最值越小越好。

第  $i$  个评价指标的熵定义为:

$$H_i = -\frac{1}{\log_2 n} \sum_{j=1}^n w_{ij} \log_2 w_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (5-23)$$

式中:

$$w_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{j=1}^n b_{ij}} \quad (5-24)$$

并假定, 当  $w_{ij}=0$  时,  $w_{ij} \log_2 w_{ij}=0$ 。

第  $i$  个指标的熵权  $\lambda_i$  为:

$$\lambda_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i} \quad (5-25)$$

将可行方案集映射到空间距离:

$$L_p(\lambda, j) = \left| \sum_{i=1}^m \lambda_i^p (1 - d_{ij})^p \right|^{\frac{1}{p}} \quad (5-26)$$

一般情况下, 取  $p=1$

$$L(\lambda, j) = 1 - \sum_{i=1}^m \lambda_i d_{ij} \quad (5-27)$$

显然, 按照  $L(\lambda, j)$  值大小进行排序, 距离小者更接近理想值。

### 5.3.3 生态产业链网结构的熵与耗散结构的序的关系

熵是热力学第二定律的定量化的概念,近年来,熵理论被扩大应用于自然科学、社会科学、管理科学等许多领域。它是系统混乱度或无序度的量度函数,因此熵的大小反映了系统所处状态的稳定情况,熵的变化指明系统运行的方向,熵增加的方向就是从有序到无序的方向,也就是说,熵的增加就意味着无序度的增加,熵的减少就意味着有序度的增加。在信息论中,信息被用来表示系统的有序程度,信息熵则是一个对随机事件不确定性进行度量的概念。对系统来说,信息熵理论已经成为研究系统结构有序度和适应环境变化柔性度的一个有效工具,也就是说,熵是综合地描述系统状态混乱性和无序度的度量。生态产业链网结构作为一个系统,同样可以用熵来度量其相对应的“序”的程度,也就是其所处状态的有序程度。

从前文的分析可知,首先,生态产业链网结构的结构熵中的时效熵对资源配置效果的度量;结构熵中的质量熵是对资源配置效率的度量,生态产业链网结构中资源的配置效率与配置效果越高,有序性越高。同样,生态产业链网结构的功能熵是通过构建一系列评价指标体系,考察生态产业链网结构整体运行的健康程度。

耗散结构中的序是指系统中子系统之间的相互联系,以及这种联系在时空结构和功能结构中的表现。序包括结构序和功能序。结构序是表征系统结构的规则性和顺序性,表示系统内部各子系统相互联系和作用的方式,又分为时间序和空间序。时间序是指系统在发展变化时,时间上先后的秩序,即确定而有规则的进程。空间序是指系统在空间分布的规则,即按照一定的方式排列和结合的空间分布。功能序是指系统与外部环境相互联系和作用过程的秩序和能力,体现了系统与外部环境之间的物质、能量和信息的输入输出的变换关系。对于生态产业链网结构来说,结构序是指链网的结构,其中时间序是指节点企业之间物质、能量和信息的流通,尤其是副产品或废弃物的交换关系,空间序是指任一节点企业与上游和下游企业链接的数量。功能序是指生态产业链网结构与外在环境的关系,可以用它的宏观运行状态来表示,也就是说,可以用环境效益和经济效益来反映功能序。

因此,生态产业链网结构的熵和耗散结构中的序之间存在对应关系,如图5-6所示。

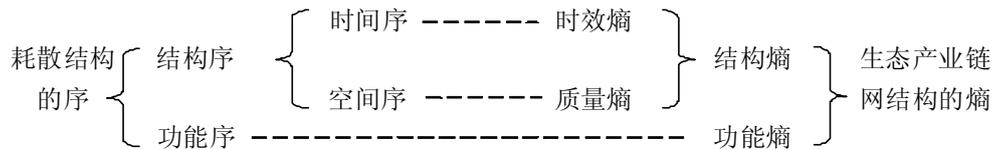


图 5-6 生态产业链网结构的熵与耗散结构的序的对应关系

## 5.4 应用算例

### 5.4.1 结构熵的测算

以某生态产业链网结构为例来说明有序度的测算方法,为了简单明了的说明问题,假设结构调整前如图 5-7 所示。

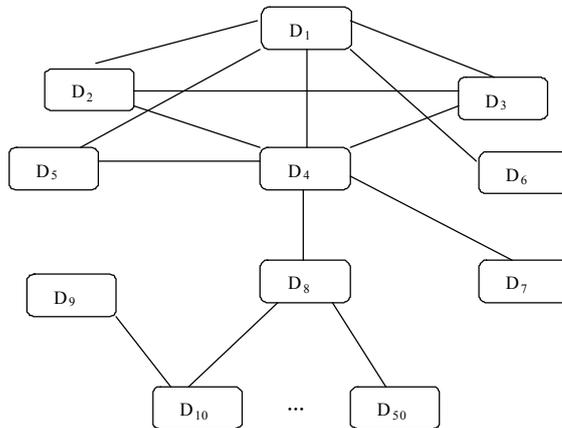


图 5-7 结构调整前生态产业链网结构示意图

从图中可以看出节点企业链接的深度和链接的跨度,如表 5-6 所示和表 5-7 所示。

表 5-6 节点企业链接深度表

链接深度 ( $L_{ij}$ )	链接的下标号	链条合计	微观态 ( $A_1$ )	$P_1(i,j)$
1	1-2; 1-3; 1-4; 1-5; 1-6; 2-3; 2-4; 3-4; 4-5; 4-7; 4-8; 8-10~50; 9-10~50;	93	93	1/2215
2	1-7; 1-8; 2-5; 2-6; 2-7; 2-8; 3-5; 3-6; 3-7; 3-8; 4-10~50; 5-6; 5-7; 5-8; 7-8; 8-9;	96	$96*2=192$	2/2215

3	1-10~50; 2-10~50; 3-10~50; 4-9; 5-10~50; 6-8; 7-10~50;	247	$247*3=741$	3/2215
4	1-9; 2-9; 3-9; 5-9; 6-10~50; 7-9;	984	$41*6*4=984$	4/2215
5	6-9;	41	$41*5=205$	5/2215
总计			2215	1

表 5-7 节点企业链接跨度表

链接跨度 ( $M_i$ )	链接的下标号	节点合计	微观态 ( $A_2$ )	$P_2 (i_j)$
1	6, 7	2	1	1/185
2	5, 10~50	42	$42*2=84$	2/185
3	2, 3	2	$2*3=6$	3/185
5	1	1	$1*5=5$	5/185
6	4	1	$1*6=6$	6/185
41	9	1	$1*41=41$	41/185
42	8	1	$1*42=42$	42/185
总计			185	1

假设时效和质量的权重系数  $\alpha$ 、 $\beta$  为 0.5，生态产业链网结构的有序测算如表 5-8 所示。

表 5-8 生态产业链网结构有序度表

时效的测算	时效微观态	$A_1=2215$
	最大时效熵	$H_{1m}=\log_2 2215=11.1131$
	时效熵	$H_1=9.3928$
	时效	$R_1=0.1548$
质量的测算	质量微观态	$A_2=185$
	最大质量熵	$H_{2m}=\log_2 185=7.5314$
	质量熵	$H_2=4.5085$
	质量	$R_2=0.4014$
有序度		$R=0.2781$

假设由于节点企业生产规模的变化，导致生态产业链网结构出现了局部的链接调整，节点企业  $D_{52}$  进入生态产业链网结构，如图 5-8 所示。

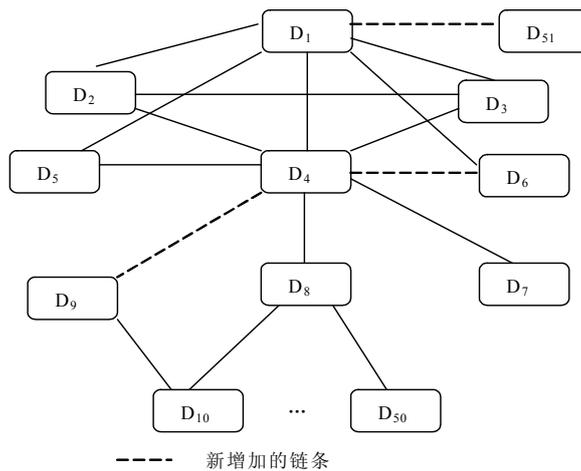


图 5-8 结构调整后生态产业链网结构示意图

同样地，可以测算出结构调整后生态产业链网结构的时效熵、质量熵、时效、质量和有序度，有序度对比如表 5-9 所示。

表 5-9 生态产业链网结构有序度对比表

	时效熵	质量熵	时效	质量	有序度
结构调整前	9.3928	4.5085	0.1548	0.4014	0.2781
结构调整后	9.4192	4.8438	0.1188	0.3343	0.2265

从表中可以看出，无论是时效还是质量，该生态产业链网结构在调整后都高于调整前，这说明物质、能量和信息等生产要素在生态产业链网结构内部的配置效果和配置效率都有所提高。

### 5.4.2 功能熵的测算

假设该生态产业链网结构已经运行了 4 年，根据评价指标选择原则和生态产业链网结构的特点，并且为了简单明了的说明问题，仅考虑体现环境效益和经济效益的重要指标，建立评价指标体系和相应指标值如表 5-10 所示。

表 5-10 生态产业链网结构评价指标体系和指标值 (%)

	总产值年平均增长率	废弃物、副产品处理成本占总成本比例	资源消耗下降比率	资源产出率	高新技术占总产值比重
第 1 年	6	35	13	65	45
第 2 年	5	34	9	67	43
第 3 年	9	30	12	68	47
第 4 年	8	29	10	70	50

对评价矩阵标准化得到:

$$b_{ij} = \begin{bmatrix} 0.667 & 0.829 & 1.000 & 0.929 & 0.900 \\ 0.556 & 0.853 & 0.692 & 0.957 & 0.860 \\ 1.000 & 0.967 & 0.923 & 0.971 & 0.940 \\ 0.889 & 1.000 & 0.769 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix}$$

第  $i$  个评价指标的熵为:

$$H_i = [0.845 \ 0.859 \ 0.855 \ 0.861 \ 0.860]$$

第  $i$  个评价指标的熵权为:

$$\lambda_i = [0.215 \ 0.196 \ 0.202 \ 0.193 \ 0.194]$$

空间距离为:

$$L(\lambda, j) = [0.138 \ 0.222 \ 0.039 \ 0.070]$$

排序结果如表 5-11 所示。

表 5-11 排序结果

	第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 4 年
$L(\lambda, j)$	0.138	0.222	0.039	0.070
排序	3	4	1	2

从以上分析得出,生态产业链网结构运行质量在第 3 年有一个飞跃,从指标体系中可以看出,由于技术有了很大的改善,各项指标比前几年都有了较大的提高。但是从排序结果可以看出,生态产业链网结构的有序度出现上下波动的周期性,总体趋势是上升状态,说明该生态产业链网结构的运行质量在逐步提高。

## 5.5 本章小结

将有序的概念引入到生态产业链网结构的研究领域,分析了影响生态产业链

网结构有序运行的影响因素。采用投入产出方法从定量的角度探讨了生态产业链网结构在受到市场需求波动的影响下，能够调整内部的生产适应环境的变化。生态产业链网结构受到内在和外在因素影响时会表现出两个趋势：有序运动和无序运动。针对这种情况，提出了生态产业链网结构有序的测算方法，从结构和功能两个方面构建了结构熵和功能熵，定量测算生态产业链网结构的有序程度，并进行了实证研究。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 全文结论

本论文融合众多学者的研究成果,在剖析生态产业链网结构的耗散结构特征的基础上,针对生态产业链网结构在构建和发展延伸过程中补链企业的选择和评价问题、节点企业之间由于协同收益的分配问题、生态产业链网结构有序测算问题进行数学建模、理论分析及实证验证,力求探索生态产业链网结构运作的影响机制和规律。本文主要创新点如下:

#### 1. 生态产业链网结构中补链企业的选择和评价分析

首先从生态产业链网延伸和发展的角度提出了补链企业的概念,对卡伦堡和贵港(制糖)国内外两个成功的生态工业园进行了探讨,从实践的角度分析了生态产业链网结构的发展过程引入补链企业情况,以及补链企业对于生态产业链网结构的稳定发展具有重要意义。在此基础上,提出生态产业多样性是引入补链企业的主要依据,同时对生态产业链网的补链企业选取原则进行了定性分析。在研究国内外相关成果的基础上,建立了补链企业的评价指标体系,提出了将主观和客观赋权方法相结合的权重确定方法。由于可拓学中的优度评价法具有描述非满足不可的条件、用关联函数的正负值反映一个对象的利弊程度等优点,将其引入到生态产业链网结构的评价研究领域中,构建了选取补链企业的评价方法。

#### 2. 生态产业链网结构协同收益分配模型构建

从生态产业链网结构的节点企业的立体网络形式探讨了生态产业链网结构内部协同关系,得出节点企业之间的生态协同生产会提高整个链网结构的效率。这些副产品交换等的协同关系使链网结构的整体资源和能力超过各个节点企业的综合,即创造出新增收益。创造性地从协同的角度将协同收益概念引入到生态产业链网结构的研究领域,并探讨了协同收益的主要来源。通过节点企业的进化博弈定量分析了协同收益分配是否公平合理决定了链网演化的稳定和方向。针对现有利益分配方法的局限,建立了包括生态技术水平、生态贡献、投入水平和承担的风险四个主要影响因素的协同收益分配因子,并以蒙西工业园区中的二氧化碳生态产业链为例,探讨了该分配因子的实际应用。

#### 3. 生态产业链网结构有序的影响因素控制及其测算

本文将有序的概念引入到生态产业链网结构的研究领域,分析了影响生态产业链网结构有序运行的影响因素。采用投入产出方法从定量的角度探讨了生态产业链网结构在受到市场需求波动的影响下,能够调整内部的生产适应环境的变化。生态产业链网结构受到内在和外在因素影响时会表现出两个趋势:有序运动和无序运动。针对这种情况,提出了生态产业链网结构有序的测算方法,从结构和功能两个方面构建了结构熵和功能熵,定量测算生态产业链网结构的有序程度,并进行了实证研究。

## 6.2 研究展望

作为一种新生事物,生态产业链网结构的稳定发展问题目前虽已得到社会各界的广泛关注,也取得了一定的研究成果。但生态产业链网结构仍是一个较新的研究领域,还需要我们采用不同的方法和途径,从不同的领域以及不同的层次进行进一步的探索。另外,国内外相关的研究不多,可借鉴的成果较少,现有的也绝大部分都是定性的研究。由于生态产业链网结构比较复杂,很多问题无法完整地量化表达,因此只能选取其中一部分问题力求用定量的方法对其做出研究,找出普遍规律,以此为生态产业链网结构的运行和管理提供指导。虽然本文取得了一些有价值的研究成果,但是由于个人知识和研究时间所限,论文还有很多有意义的领域没有涉及,还需要不断加以拓展和深化。以下几个方面为本论文的不足之处和有待进一步研究的重点:

1. 在生态产业链网结构的补链企业选择和评价方面,本文仅从链网在发展过程中某一产业链出现了延伸时引入补链企业的情况。在未来的研究中,当生态产业链网结构的结构出现变化导致某些节点企业退出时,为了链网的稳定发展需要建立退出企业的选择和评价体系。

2. 本文虽然对生态产业链网结构的协同收益的概念做了界定,但是由于任何概念都存在多个维度,难免出现挂一漏万的缺憾,因此还有必要对节点企业间的协同收益进行更为广泛和深入的分析,以便使相关研究不断得到充实。

3. 本文从四个方面建立了协同收益的分配模型,为相关研究提供了有益的研究视角,但是由于副产品交换导致生态产业链网结构的收益在节点企业之间出现转移等问题,因此协同收益分配的影响因素和模型构建还有待做进一步的补充和完善。

4. 本文对生态产业链网结构有序的影响因素和测算进行了研究,但是生态产业链网结构的影响因素对其自身正常运行的影响程度,本文的研究还明显不足,这也是下一步研究有待加强之处。

5. 由于生态产业链网结构的发展历史较短, 因此相关数据的收集存在一定困难, 本文没有进行有序衡量标准和生态产业链网结构突变阈值的研究, 从长期来看, 这也是今后的一个研究方向。

另外, 由于生态产业链网结构发展历史较短, 这势必会使相关的研究方法受到较大的局限性。因而, 对生态产业进行更多基础性研究也是极为迫切的。总之, 如何加强和不断提高生态产业链网结构的稳定发展还是一个有待逐步完善的研究领域, 其目前所存在的问题也为今后的研究指明了方向。我们也有理由相信, 随着实践经验的累积和理论体系的发展, 这一领域的研究必然会不断丰富和完善。

## 参考文献

- [1] 冯之浚, 循环经济导论, 北京: 人民出版社, 2004. 20
- [2] 甘永辉, 生态工业园区工业共生研究—江西循环经济及生态工业园区发展研究, 博士学位论文, 南昌大学, 2007
- [3] 姚蕾. 构建和谐社会发展循环经济. 北方经济, 2006, 13 (3): 79-80
- [4] 钱易, 唐孝炎环境保护与可持续发展北京: 高等教育出版社, 2000. 258-261
- [5] 劳爱乐[美], 耿勇编著. 工业生态学和生态工业园. 北京: 化学工业出版社, 2003
- [6] 吴峰等. 生态工业园规划设计与实施, 环境科学学报, 2002, 22(6): 802-803
- [7] 苏伦. 艾尔克曼著, 徐兴元译, 工业生态学, 北京: 经济日报出版社, 1999
- [8] 刘力, 郑京淑. 产业生态研究与生态工业园开发模式初探, 经济地理, 2001 (5): 620-623
- [9] 刘志峰, 林巨广等. 绿色制造的理论基础—工业生态方法研究, 中国机械工程, 2002, 13(17): 1476-1479
- [10] 王灵梅, 张金屯. 火电厂生态工业园生态规划研究. 环境保护, 2003 (12): 25-29
- [11] 陈杰, 屠梅曾, 赵旭. 生态供应链下环境型采购的博弈分析, 系统工程理论方法应用, 2004, 13(3): 268-271
- [12] 边均兴. 面向可持续发展的生态工业园建设理论与方法研究. 天津大学博士学位论文, 2005.
- [13] 张艳. 生态工业园工业共生系统的构建与稳定性研究. 华中科技大学博士学位论文, 2006.
- [14] 王兆华, 尹建华, 武春友. 生态工业园中的生态产业链结构模型研究. 中国软科学, 2003, 2-19.
- [15] 徐大伟, 王子彦, 郭莉. 工业生态系统演化的耗散结构理论分析, 管理科学, 2004, 17(6): 51-56
- [16] 费金玲. 生态工业园区的系统稳定性研究, 上海大学硕士学位论文, 2007
- [17] 肖忠东, 工业生态制造中物质剩余理论研究, 西安: 西安交通大学博士论文, 2002
- [18] 武春友, 邓华, 段宁. 产业生态系统稳定性研究述评, 中国人口·资源与环境, 2005, 15 (5): 20-25
- [19] 朱睿. 生态工业园工业共生网络稳定性研究, 辽宁工程技术大学硕士学位论文, 2006
- [20] 王秀丽. 生态产业链运作机制研究, 天津大学博士学位论文, 2007
- [21] Lowe E, Warren J, and Moran S. Discovering industrial ecology: an executive briefing and course book, Battelle press, Columbus, 1997
- [22] Ayres, R. U. Industrial Metabolism: Theory and Policy. In the Greening

- of Industrial Ecosystems. by D. J. Richards, B. R. Allen and R. A. Frosch. eds. Washinton: National Academy of Science. 1995.
- [23]张秋根,王桃云等.生态工业园及其建设.环境污染治理技术与设备.2003,4(3)
- [24]钟书华.工业生态学与生态工业园.科技管理研究.2003,23(1).
- [25]孙大鹏,苏敬勤,生态工业园价值链分析及管理研究.大连理工大学学报(社科版),2004(6).
- [26]Bjorn Stigson, A Road to Sustainable Industry: How to Promote Resource Efficiency in Companies, Dusseldorf: WBCSD, 2001
- [27]岳琴,尹琦.可更新资源生态产业链的利益机制,经济师,2005,9(5):59-60
- [28]席桂萍.生态工业园区内企业共生关系的经济学分析,河南农业大学学报,2004,(6)
- [29]袁增伟,毕军,王习元等.苏州工业园区生态工业园建设构想及效益预分析,地域研究与开发,2005,24(5):48-57
- [30]甘永辉,杨解生,黄新建.生态工业园工业共生效率研究,南昌大学学报(人文社会科学版),2008,39(3),75-80
- [31]郝海,郑丕镆.基于 Shapley 值的供应链合作伙伴利益风险分配机制.哈尔滨工业大学学报:社会科学版,2005.7(5):71-75.
- [32]Nash J. F. The bargaining problem. *Econometrica*, 1950, (18): 155-162.
- [33]叶飞.虚拟企业利益分配新方法研究.工业工程与管理,2003,(6):44-46,58.
- [34]Cachon, G. P. Competitive supply chain inventory management. *Quantitative Model for Supply Chain Management*, Kluwer Academic Publishers.
- [35]Jeuland, M. E, S. M. Shugan. Managing channel profits. *Marketing Science*, 1983, 2(3): 239-272.
- [36]Whang S. Coordination in operations: a taxonomy. *Journal of Operations Management*, 1995, (12): 413-422
- [37]林勇,马士华.供应链企业合作机制与委托实现理论.南开管理评论,2000.(2):49-53
- [38]Corbett, C. J., X. De Groote. A supplier's optimal quantity discount policy under asymmetric information. *Management Science*, 2000, 46(3): 444-450.
- [39]S. Fatima, M. Wooldridge. Multi-issue negotiation under time constraints. *Proceeding 1st of International Joim Conference. on Autonomous Agent and Multi-Agent Systems. Bologna, Italy, 2002*, 143-150.
- [40]S. Fatima, M. Wooldridge. An agenda-based framework for multi-issue negotiation. *Artificial Intelligence*, 2004, 152(1):1-45.
- [41]Faratin. P. , Sierra. C. , Jermings, N. R. , Negotiation decision functions for autonomous agent. *Robotics and Autonomous Systems*, 1998, 24(3-4):

- 159-328.
- [42] 马士华. 市场需求波动下供应链的企业间合作模式研究. 高技术通讯, 2003, (9): 67-70.
- [43] 伍云山, 张正祥. 逆向供应链的激励机制研究. 工业工程, 2006, 9(1): 52-55
- [44] 张弦, 季建华. 消费者行为和城市垃圾收运系统对废旧产品进入逆向供应链的影响. 上海管理科学, 2004, (5): 43-46.
- [45] 顾巧论, 季建华, 高铁杠等. 有固定需求底线的逆向供应链定价策略研究. 计算机集成制造系统, 2005. 11(12): 1751-1757.
- [46] 侯云章, 戴更新, 于庆东. 二次订货策略在单周期产品逆向供应链中的应用. 系统工程理论与实践, 2005, (11): 35-40.
- [47] 申亮, 王玉燕. 不完全信息下的逆向供应链中的信号博弈研究. 工业技术经济, 2007, 26(17): 65-68.
- [48] 王文宾, 达庆利. 考虑消费者利益的逆向供应链利润分配. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(14): 726-730.
- [49] Tsay, A. A, W. S. LoV 巧 oy. Quantity flexibility contracts and supply cain performance. Manufacturing&Service Operations Management, 1999, 1(2): 89-111.
- [50] Tsay, A. A, S. Nahmias, N. Agrawal. Modeling supply chain contracts: a review. Quantitative Models for Supply Chain Management, Kluwer Academic Publishers. 1999
- [51] Anupindi . R, Y. Bassok. Centralization of stock: retailers VS manufacturer. ManagementScience, 1999, 45(2): 178-191.
- [52] Webster, S, Z. K Weng. A risk-free perishable item returns policy. Manufacturing&Service Operations Management, 2000, 2(1): 100-106.
- [53] Glenn. D. W, M. L. Puterman. Product return guarantees for less optimistic retailers. Working Paper, University of British Columbia, 2002.
- [54] Guide Jr. , V. D. 心 L. N. Van Wassenhove. Managing product returns for remanufacturing. Production and Operations Management, 2001, 10(2): 142-155.
- [55] 顾巧论, 陈秋双. 不完全信息下逆向供应链中制造商的最优合同. 计算机集成制造系统, 2007, 13(3): 596-601.
- [56] Gerchak, Y, Y. Wang. Capacity games in decentralized assembly systems, with uncertain demand. Working Paper, Tel-Aviv University, 2002.
- [57] Pasternack, B. A. The capacimted newsboy problem with revenue sharing. JAMDS, 2001, 5(1): 21-33.
- [58] Cachon, G. . P, M. A. Lariviere. Turning the supply chain into a reveლაue chain. Harvard Business Review, 2001, 79(3): 20-21
- [59] Porteus, E. S. Whang. On manufacturing/marketing incentives. Management Science, 1991, 37(9): 1161-1181.

- [60]Sapp Jan, Concepts of Symbiogenesis: Yale University Press, 1992, 100-105
- [61]Maurice J. Caullery, Parasitism and Symbiosis, London: Sidgewick and Jackson, 1952, 252-253
- [62]Lewin R. A., Symbiosis and Parasitism: Definitions and Evaluations, BioScience, 1982, 32 (4) : 254-260
- [63]Macarthur R., Wilson, The Theory of Island Biogeography, Princeton: Princeton University Press, 1967
- [64]冯蔚东, 陈剑. 虚拟企业中伙伴收益分配比例的确定. 系统工程理论与实践, 2002(4): 45-49
- [65]Ossadnik W. AHP-based synergy allocation to partners in a merger. European Journal of Operational Research, 1996(1): 42-49
- [66]陈一鸣, 黄卫. 不同协作企业预期收益结构下的虚拟企业稳定性探讨. 中国管理信息化(综合版). 2005(12): 55-56
- [67]Chang J. J., Lai C. C., Lin C. C.. Profit sharing, worker effort and double-sided moral hazard in an efficiency wage model. Journal of Comparative Economics, 2003(1): 75-93
- [68]李红玲, 钟书华, 企业技术联盟效益及其分配. 科学学与科学技术管理, 2001, 06: 7-10
- [69]吴宪华. 动态联盟分配格局研究, 系统工程, 2001, 19(3): 31-34
- [70]卢少华等. 动态联盟企业的利益分配博弈, 管理工程学报, 2004, 02
- [71]孙东川, 叶飞. 动态联盟利益分配的谈判模型研究. 科研管理, 2001(2): 91-95
- [72]陈菊红, 汪应洛, 孙林岩. 虚拟企业收益分配问题博弈研究. 运筹与管理, 2002(1): 11-16
- [73]郑文军, 张旭梅. 敏捷虚拟企业利润分配机制研究. 管理工程学报, 2001(1): 26-29
- [74]韩建军, 郭耀煌. 基于事前协商的动态联盟利润分配机制. 西南交通大学学报, 2003(6): 686-690
- [75]李晓东, 区域经济有序程度的微观度量—经济熵的提出及理论研究和应用, 东北师范大学硕士学位论文, 2006
- [76]胡文新, 论产业结构演进的有序性, 湖北电大学刊, 1995, (11): 1-5
- [77]李伟刚, 复杂系统结构有序度-负熵算法, 系统工程理论与实践, 1988, (4), 15-22
- [78]任建雄, 基于耗散结构论的开发区有序演化机制研究, 2007, (11), 106-107, 123
- [79]Lowe, Ernest A, Moran, Steven R, Holmes, Douglas B, Eco-industrial Parks a Handbook for Local Development Teams, Oakland, CA: Indigo Development, RPP International, 1998
- [80]Côté Raymond et al, Eco-industrial-parks, Ann Arbor, Michigan: University of Michigan, International Society for Industrial Ecology Conference, June 29, 2003
- [81]Anja-Katrin Fleig, Eco-industrial Parks A Strategy Towards Industrial

- Ecology in Developing and Newly Industrialised Countries, Eschbom, Germany: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), GmbH, 2000
- [82] Sumita Majumdar, Developing an Eco-industrial Park in the Lloydminster Area, Ottawa, CA: Dissertation for Master of Science in Civil Engineering, University of Calgary, 2001
- [83] G. Zilahy, Organisational Factors Determining the Implementation of Cleaner Production Measures in the Corporate Sector, Journal of Cleaner Production 2004, 12: 311-319
- [84] Holly Marie Morehouse, A Spatial Decision Support System for Environmentally Sustainable Communities, Ann, Arbor, MI: Dissertation for Ph.D. in Clark University, 2002
- [85] Catherine Hardy, Thomas E. Graedel, Industrial Ecosystems as Food webs, Journal of Industrial Ecology, 2002, Volume 6: 29-38
- [86] Gregory David Rose, Social experiments in innovative environmental Management: The Emergence of Ecotechnology, Waterloo, Ontario, Canada: Dissertation for Ph.D. in Planning in Waterloo University, 2003
- [87] Pauline Deutz, David Gibbs and Amy Proctor, Eco-industrial Development: its Potential as a Stimulator of Local Economic Development, New Orleans: Annual Meeting of the Association of American Geographers, March 2003: 11-15
- [88] 楼园, 赵红. 企业生态系统模型及非生物环境因素分析, 数量经济技术经济研究, 2002, 19 (3) :61-64
- [89] 王兆华, 生态工业园工业共生网络研究. 大连理工大学博士学位论文, 2003
- [90] 段宁, 邓华, 武春友. 我国生态工业系统稳定性的结构型因素实证研究, 环境科学研究, 2006, 19 (2) :57-61, 81
- [91] 向来生, 张纯东, 孙 磊. 产业生态系统稳定性分析及合作博弈法的应用, 山东科技大学学报 (自然科学版), 2007, 26 (5) :66-68
- [92] 喻宏伟, 齐振宏, 冯智能. 博弈论视角下生态工业园稳定性实证研究, 工业技术经济, 2007, 26 (9) : 71-73, 83
- [93] 徐立中, 秦荪涛. 基于价值链的生态产业共生系统稳定性对策研究, 财经论丛, 2007 (2) :90-96
- [94] 袁婕, 樊鸿涛, 张炳等. 基于能值理论的工业生态系统分析-以龙盛科技工业园为例, 环境保护科学, 2008, 34 (2) : 74-77
- [95] 孙凤芹. 生态工业园中企业链稳定性的理论与应用研究, 河北理工大学硕士学位论文, 2005
- [96] 兰友根. 虚拟生态工业园区构建与生态工业链稳定性研究, 天津理工大学硕士学位论文, 2005
- [97] 陶长琪. IT 企业机群的共生性和稳定性研究, 科技管理研究, 2004 (5) : 62-64
- [98] 郭莉, 苏敬勤. 基于 Logistic 增长模型的工业共生稳定分析, 预测, 2005, 24

- (1) : 25-29
- [99]Paul H, Templet, Diversity and other Emergent Properties of Industrial Economies, Progress in Industrial Ecology, 2004, 1: 24-38
- [100]顾江. 生态系统稳定性统计模型分析运用, 数量经济技术经济研究, 2001, 1: 98-100
- [101]李敏. 生态工业园中生态产业链网分析及其稳定性评价研究, 硕士学位论文, 天津大学, 2007
- [102]蔡小军. 生态产业园竞争力研究, 北京工业大学博士学位论文, 2007
- [103]袁纯清. 共生理论-兼论小型经济, 北京: 经济科学出版社, 1998
- [104]Erkman S., Industrial Ecology: a Historical View, Journal of Cleaner Production, 1997, 5 (1) : 1-10
- [105]Frosch R. A., The Industrial Ecology of the 21st Century, Scientific American, 1995, (9) : 65-69
- [106]Ayres Robert , Industrial metabolism: In Technology and the Environment, Washington, DC: Natl. Acad. Press, 1989, 23-49
- [107]Lifset Reid, A Metaphor, a Field, and a Journal, Journal of Industrial ecology, 1998, 1 (1) : 1-3
- [108]Bass Leo, Frank Boons, Sustainable Development and Industrial Ecology, University of Manchester, 2000
- [109]Schwarz E. K., Steininger, The Industrial Recycling-Network Enhancing Regional Development, Research Memorandum, 1995, 9501 (4) : 96-100
- [110]宋毅, 何国祥. 耗散结构, 北京: 中国展望出版社, 1986
- [111]李如生. 非平衡态热力学和耗散结构, 北京: 清华大学出版社, 1986
- [112]沈小峰, 胡岗. 耗散结构论, 上海: 上海人民出版社, 1987
- [113]颜泽贤. 新兴学科概览-耗散结构与系统演化, 福建人民出版社, 1987
- [114]王迪云. 旅游耗散结构系统开发理论与实践, 中国市场出版社, 2006
- [115]井然哲, 覃正. 企业集群系统自组织和谐发展探析, 科学学研究, 2005, 23(4) : 550-554
- [116]张杰, 基于自组织理论的区域系统演化发展研究, 哈尔滨工程大学博士学位论文, 2007
- [117]项清焕. 信息经济的发展研究, 西安: 陕西科学技术出版社, 1987
- [118]胡传机. 非平衡系统经济学, 石家庄: 河北人民出版社, 1987
- [119]李崇阳, 王龙妹. 产业系统耗散结构的形成与演化初探, 福建论坛(经济社会版), 1995(3)
- [120]赵叔平, 刘昌. 耗散结构经济模型在市场体系中的可行性研究, 技术经济, 1998(11): 23-25
- [121]马步瀛, 吉国玲. 国有企业的现状与创新-耗散结构理论的运用. 经济问题, 1995(7) : 33-35
- [122]胡继灵. 高新技术企业管理原则的耗散结构理论观, 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2001(3)

- [123]孙继维.产业企业的"耗散结构体"理论分析,华南师范大学学报(社会科学版),1997(4)
- [124]程金香.生态工业园建设中的企业耦合研究,西北大学硕士论文,2004
- [125]方大春.耗散结构视角下欠发达县域经济发展研究,河海大学博士论文,2007
- [126]孙继维.从耗散结构论到复杂大系统的可持续发展,科技管理研究,2007(11):270-272
- [127]王灵梅.火电厂生态工业园研究—以朔州火电厂生态工业园为例,山西大学博士学位论文,2004
- [128]王兆华,尹建华.生态工业园中工业共生网络运作模式研究,中国软科学,2005(2)
- [129]韩玉堂.生态工业园中的生态产业链系统构建研究,博士学位论文,中国海洋大学,2009
- [130]Cote, Raymond, T.Kelly, H.Reid,T.Smolenaars, The Industrial Park as an Ecosystem: Cross Sectoral CaseStudies.Halifax, NovaScotia: Dalhousie University, School for Resource and Environmental Studies, 2000,90-92.
- [131]Wallner,H.P.,Regional Embeddedness of Industrial Parks-Strategies for Sustainable Production Systems at the Regional Level . Journal of Cleaner Production, 4: 4, 2001, 56-58.
- [132]Schlarb, Mary and Ed Cohen-Rosenthal, Eco-Industrial Developments, Sustainable Architecture White Papers. NewYork: Earth Pledge Foundation, 2002,33-35.
- [133]A.J.D. Lambert, F.A.Boons, Eco-industrial Parks: Stimulating Sustainable Development in Mixed Industrial Parks. Technovation (22), 2003,471-484.
- [134]秦丽杰.吉林省生态工业园建设模式研究,东北师范大学博士学位论文,2008
- [135]蔡晓明.生态系统生态学.北京:科学出版社,2000
- [136]Gertler Nicholas and J. Ehrenfeld, Industrial Symbiosis in Kalundborg: Development and Implications, Program on Technology, Business, and Environment Working Paper, Cambridge, MA:MIT. 1994, 102-104.
- [137]邱苑华.管理决策与应用熵学.北京:机械工业出版社, 2002: 193-206
- [138]郭东强.利用熵权系数法评价企业信息化建设项目.运筹与管理, 2003, 12(3): 76-79
- [139]蔡文,杨春燕,林伟初.可拓工程方法.北京:科学出版社,2000: 86-116
- [140]高洁,戴建新,王雪红.可拓决策方法综述.系统工程理论方法应用,2004,13(3): 264-267
- [141]蔡文,物元模型及其应用.北京:科学技术文献出版社,1994:21-189.
- [142]孙晓东,焦玥,胡锦涛.优度评价法在物流联盟成员选择中的应用.工业工程,2006,9(6): 113-117
- [143]路琨.面向工业园区的循环经济理论与方法研究,天津大学博士学位论文,2007
- [144]赵强.产业集群信用优势的层面与博弈分析,工业工程与管理,2005,(4): 31-34

- [145]刘笑平,雷定安.论外部性理论的内涵及意义.西北师大学报(社会科学版).2002,39(3): 72-75
- [146]高鸿业.西方经济学,北京:中国人民大学出版社,1999
- [147]Gulati, Ranjay Alliance and Networks. *Strategic Management Journal*, 1998(19): 293
- [148]Beamish, Killing ed. *Cooperative Strategies: European Perspectives*. The new LexiIlgcon Press. 1997: 3-49, 89-132
- [149]王立志,韩福荣.企业间的协同进化分析,科技管理研究,2003(2):19-21
- [150]H. 哈肯.信息与自组织—复杂系统中的宏观方法,四川教育出版社,1988
- [151]普里高津.从混沌到有序人与自然新对话.上海译文出版社,1987
- [152]马士华,王鹏.基于 Shapley 值法的供应链合作伙伴间收益分配机制,工业工程与管理,2006,(4),43-49
- [153]刘浪,唐海军,陈仲君.Shapley 值在动态联盟利益分配博弈分析中的应用,工业工程,2006,9(6),118-121
- [154]李艳丽.供应链成员间的利益分配机制.经济论坛,2004 (1)
- [155]长青,文宗川.一种新因素贡献计算方法的探讨,内蒙古工业大学学报,2001,01
- [156]朱爱辉等.动态联盟企业利润分配率模型研究,科技管理研究,2004,02
- [157]赵涛.管理学,天津:天津大学出版社,2008
- [158]孙国强.网络协作环境下的利益分配理论与模型,管理科学,2003,12
- [159]尚海洋.博弈论方法在工业生态系统分析中的应用初探,西北师范大学学报(自然科学版),2006,42(1):96-100
- [160]孙儒泳,李庆芬,牛翠娟等.生态学,北京:科学出版社,2000:8-101
- [161]C.S.Honing. *Engineering Resilience versus Ecological Resilience*, Washington, D.C.:National Academy Press,1996
- [162]Svirezhev. *Modern problem of mathematical ecology International Congress Math*,1983
- [163]梁启华.相关技术及衍生技术对产业集聚的影响机理,科学学与科学技术管理,2005,(4):48-51
- [164]李映照.基于技术转让的企业集聚形成条件:一个理论模型,系统工程,2006,24(2):11-14
- [165]Ayres.R.U. *Resource Environment and Economics:Appliations od the Material Energy Balance Principle*.New York:John Willey & Sons,1978
- [166]黄贤金.循环经济: 产业模式与政策体系.南京:南京大学出版社,2004,121-180
- [167]邓华.我国产业生态系统 (IES) 稳定性影响因素研究,大连理工大学博士毕业论文,2006
- [168]蔡绍洪,彭仕政等.耗散结构与非平衡相变原理及应用,贵州科技出版社,1998
- [169]许国志.系统科学,上海科技教育出版社, 2000, 186-190
- [170]陈一鸣,黄卫.不同协作企业预期收益结构下的虚拟企业稳定性探讨.中国管理信息化(综合版).2005(12): 55-56
- [171]Chang J. J., Lai C. C., Lin C. C.. Profit sharing, worker effort and double-sided

- moral hazard in an efficiency wage model. *Journal of Comparative Economics*, 2003(1): 75-93
- [172] 阎植林, 邱苑华, 陈志强. 管理系统有序度评价的熵模型. *系统工程理论与实践*, 1997, (6): 45-48
- [173] 陈雷, 王延章. 基于熵权系数与 TOPSIS 集成评价决策方法的研究. *控制与决策*, 2003, 18(4): 456-459.
- [174] S.J.Davis, R.J.Leblanc. A study of applicability of complexity measures. *IEEE Trans Software Eng*, 1988, 14(9): 1366-1372.
- [175] 黄溶冰, 胡运权. 产业结构有序度的测算方法-基于熵的视角. *中国管理科学*, 2005, 14(1)

## 发表论文和科研情况说明

### 科研论文:

- [1] 李继宏, 赵涛. 企业信息化建设中业务流程管理成功关键因素的系统思考, 科技管理研究, 2008, (3):247-248
- [2] 李继宏, 赵涛. 基于熵权的优度评价法在信息化项目绩效评价中的应用研究, 北京理工大学学报(社科版), 2008, 10(3):61-64
- [3] 李继宏, 赵涛. 高等院校公共选修课的学生甄别模型分析, 中国农机化(已录用)
- [4] 李继宏, 赵涛. 具有成本差异的循环经济寡头垄断定价模型, 中国农机化(已录用)
- [5] 李继宏, 赵涛. 生态产业链网结构中补链企业的选择与评价研究(拟投稿)
- [6] 李继宏, 赵涛. 生态产业链网结构的协同收益分配模型研究(拟投稿)
- [7] 李继宏, 赵涛. 市场需求波动对生态产业链网结构有序的影响控制研究(拟投稿)
- [8] 李继宏, 赵涛. 生态产业链网结构有序的测算研究(拟投稿)

## 附 录

第三章 生态产业链网结构中补链企业的选择与评价研究  
评价模型的具体计算过程:

data1.dat

x1	x2	x3	x4	x5
0.05	0.07	0.03	0.09	0.06
0.03	0.02	0.03	0.02	0.04
0.25	0.2	0.23	0.24	0.27
0.31	0.26	0.32	0.28	0.3
14.7	15	14	17.5	15
7	7	6	9	6
9	8	9	11	8
0.45	0.43	0.49	0.52	0.46
53	50	52	58	51
0.99	0.95	0.98	0.97	0.95
0.98	0.97	0.95	0.99	0.96
0.97	0.96	0.97	0.96	0.97
0.97	0.99	0.98	0.96	0.98
0.45	0.42	0.5	0.4	0.45
0.25	0.25	0.3	0.22	0.3
0.35	0.32	0.3	0.3	0.35
0.8	0.78	0.8	0.77	0.82
0.3	0.39	0.35	0.32	0.35
0.03	0.05	0.02	0.02	0.04
0.7	0.66	0.7	0.68	0.7
0.8	0.76	0.8	0.77	0.81
0.8	0.8	0.82	0.76	0.8
0.71	0.71	0.75	0.68	0.71
0.75	0.5	0.75	1	0.75
1	0.75	0.5	1	0.75
0.6	0.62	0.6	0.57	0.6
1	0.75	0.75	1	0.75
0.1	0.1	0.09	0.12	0.07

权重计算:

```
mydata1=read.table("D:/data1.dat" , header = TRUE)
```

```
R1=(mydata1[1, ]-min(mydata1[1, ]))/(max(mydata1[1, ])-min(mydata1[1, ]))
```

```
R2=(mydata1[2, ]-min(mydata1[2, ]))/(max(mydata1[2, ])-min(mydata1[2, ]))
```

```
R3=(mydata1[3, ]-min(mydata1[3, ]))/(max(mydata1[3, ])-min(mydata1[3, ]))
```

```
R4=(mydata1[4, ]-min(mydata1[4, ]))/(max(mydata1[4, ])-min(mydata1[4, ]))
```

```

R5=(mydata1[5, ]-min(mydata1[5, ]))/(max(mydata1[5, ])-min(mydata1[5, ]))
R6=(mydata1[6, ]-min(mydata1[6, ]))/(max(mydata1[6, ])-min(mydata1[6, ]))
R7=(mydata1[7, ]-min(mydata1[7, ]))/(max(mydata1[7, ])-min(mydata1[7, ]))
R8=(mydata1[8, ]-min(mydata1[8, ]))/(max(mydata1[8, ])-min(mydata1[8, ]))
R9=(mydata1[9, ]-min(mydata1[9, ]))/(max(mydata1[9, ])-min(mydata1[9, ]))
R10=(mydata1[10, ]-min(mydata1[10, ]))/(max(mydata1[10, ])-min(mydata1[10, ]))
R11=(mydata1[11, ]-min(mydata1[11, ]))/(max(mydata1[11, ])-min(mydata1[11, ]))
R12=(mydata1[12, ]-min(mydata1[12, ]))/(max(mydata1[12, ])-min(mydata1[12, ]))
R13=(mydata1[13, ]-min(mydata1[13, ]))/(max(mydata1[13, ])-min(mydata1[13, ]))
R14=(mydata1[14, ]-min(mydata1[14, ]))/(max(mydata1[14, ])-min(mydata1[14, ]))
R15=(mydata1[15, ]-min(mydata1[15, ]))/(max(mydata1[15, ])-min(mydata1[15, ]))
R16=(mydata1[16, ]-min(mydata1[16, ]))/(max(mydata1[16, ])-min(mydata1[16, ]))
R17=(mydata1[17, ]-min(mydata1[17, ]))/(max(mydata1[17, ])-min(mydata1[17, ]))
R18=(mydata1[18, ]-min(mydata1[18, ]))/(max(mydata1[18, ])-min(mydata1[18, ]))
R19=(mydata1[19, ]-min(mydata1[19, ]))/(max(mydata1[19, ])-min(mydata1[19, ]))
R20=(mydata1[20, ]-min(mydata1[20, ]))/(max(mydata1[20, ])-min(mydata1[20, ]))
R21=(mydata1[21, ]-min(mydata1[21, ]))/(max(mydata1[21, ])-min(mydata1[21, ]))
R22=(mydata1[22, ]-min(mydata1[22, ]))/(max(mydata1[22, ])-min(mydata1[22, ]))
R23=(mydata1[23, ]-min(mydata1[23, ]))/(max(mydata1[23, ])-min(mydata1[23, ]))
R24=(mydata1[24, ]-min(mydata1[24, ]))/(max(mydata1[24, ])-min(mydata1[24, ]))
R25=(mydata1[25, ]-min(mydata1[25, ]))/(max(mydata1[25, ])-min(mydata1[25, ]))
R26=(mydata1[26, ]-min(mydata1[26, ]))/(max(mydata1[26, ])-min(mydata1[26, ]))
R27=(mydata1[27, ]-min(mydata1[27, ]))/(max(mydata1[27, ])-min(mydata1[27, ]))
R28=(mydata1[28, ]-min(mydata1[28, ]))/(max(mydata1[28, ])-min(mydata1[28, ]))

```

```

R=rbind(R1, R2,R3, R4, R5, R6, R7,R8, R9, R10, R11, R12,R13, R14, R15, R16,
R17,R18, R19, R20, R21, R22,R23, R24, R25, R26, R27,R28)

```

```

F1=(1+R)/ sum(R)

```

```

F2= log(F1)

```

```

F=as.matrix(F1)%*%t(as.matrix(F2))

```

```

H=diag(-F / log(5))

```

```

W=(1-H)/(28-sum(H))

```

```

W

```

$\theta=c(0.033,0.03, 0.043, 0.041, 0.036, 0.041, 0.036, 0.038, 0.034, 0.042, 0.035, 0.033,0.035, 0.035, 0.037, 0.044,0.042, 0.035, 0.029, 0.030, 0.039, 0.026,0.038,0.034, 0.038,0.031, 0.033,0.032)$

$\alpha =\text{diag}(W\%*\%t(\theta))/\text{sum}(\text{diag}(W\%*\%t(\theta)))$

$\alpha$

关联函数:

`mydata2=read.table("D:/data1.dat" , header = TRUE)`

`K2=as.matrix(mydata2[1,])`

`K2[K2<=0.05]=0.05-K2[K2<=0.05]-1`

`K2[K2>0.05]= K2[K2>0.05] -0.05`

`K2`

`K3=as.matrix(mydata2[2,])`

`K3 [K3<=0.02]=0.02-K3 [K3<=0.02]-1`

`K3 [K3>0.02]= K3 [K3>0.02] -0.02`

`K3`

`K5=as.matrix(mydata2[3,])`

`K5 [K5<=0.2]=0.2-K5[K5<=0.2]-1`

`K5 [K5>0.2]= K5 [K5>0.2] -0.2`

`K5`

`K6=as.matrix(mydata2[4,])`

`K6 [K6<=0.25]=0.25-K6[K6<=0.25]-1`

`K6 [K6>0.25]= K6 [K6>0.25] -0.25`

`K6`

`K7=as.matrix(mydata2[5,])`

`K7[K7<=18]=18-K7[K7<=18]`

`K7[K7>18]= 18-K7[K7>18]-1`

`K7`

`K8=as.matrix(mydata2[6,])`

`K8 [K8<=10]=10-K8 [K8<=10]`

`K8 [K8>10]= 10-K8 [K8>10]-1`

`K8`

`K9=as.matrix(mydata2[7,])`

`K9 [K9<=12]=12-K9 [K9<=12]`

K9 [K9>12]= 12-K9 [K9>12]-1  
K9  
K10=as.matrix(mydata2[8,])  
K10 [K10<=0.5]= 0.5-K10 [K10<=0.5]  
K10 [K10>0.5]= 0.5-K10 [K10>0.5]-1  
K10  
K11=as.matrix(mydata2[9,])  
K11 [K11<=55]= 55-K11 [K11<=55]  
K11 [K11>55]= 55-K11 [K11>55]-1  
K11  
K12=as.matrix(mydata2[10,])  
K12 [K12<=0.95]= 0.95-K12 [K12<=0.95]-1  
K12 [K12>0.95]= K12 [K12>0.95] -0.95  
K12  
K13=as.matrix(mydata2[11,])  
K13 [K13<=0.95]= 0.95-K13 [K13<=0.95]-1  
K13 [K13>0.95]= K13[K13>0.95] -0.95  
K13  
K14=as.matrix(mydata2[12,])  
K14 [K14<=0.95]= 0.95-K14 [K14<=0.95]-1  
K14 [K14>0.95]= K14 [K14>0.95] -0.95  
K14  
K15=as.matrix(mydata2[13,])  
K15 [K15<=0.95]= 0.95-K15 [K15<=0.95]-1  
K15 [K15>0.95]= K15 [K15>0.95] -0.95  
K15  
K16=as.matrix(mydata2[14,])  
K16 [K16<=0.4]= 0.4-K16 [K16<=0.4]-1  
K16 [K16>0.4]= K16 [K16>0.4] -0.4  
K16  
K17=as.matrix(mydata2[15,])  
K17 [K17<=0.25]= 0.25-K17 [K17<=0.25]-1  
K17 [K17>0.25]= K17 [K17>0.25] -0.25  
K17

K18=as.matrix(mydata2[16,])

K18 [K18<=0.3]= 0.3-K18 [K18<=0.3]-1

K18 [K18>0.3]= K18 [K18>0.3] -0.3

K18

K20=as.matrix(mydata2[17,])

K20 [K20<=0.75]= 0.75-K20 [K20<=0.75]-1

K20 [K20>0.75]= K20 [K20>0.75] -0.75

K20

K21=as.matrix(mydata2[18,])

K21 [K21<=0.3]= 0.3-K21 [K21<=0.3]-1

K21 [K21>0.3]= K21 [K21>0.3] -0.3

K21

K22=as.matrix(mydata2[19,])

K22 [K22<=0.02]= 0.02-K22 [K22<=0.02]-1

K22 [K22>0.02]= K22 [K22>0.02] -0.02

K22

K23= as.matrix(mydata2[20,])

K23 [K23<0.65]= K23 [K23<0.65]-0.65-1

K23 [(K23<0.85)&(K23>=0.65)]= K23 [(K23<0.85)&(K23>=0.65)]-0.65

K23 [(K23<1)&(K23>=0.85)]= K23 [(K23<1)&(K23>=0.85)]-0.85+0.1

K23

K24= as.matrix(mydata2[21,])

K24[K24<0.75]= K24[K24<0.75]-0.75-1

K24[(K24<0.85)&(K24>=0.75)]= K24[(K24<0.85)&(K24>=0.75)]-0.75

K24[(K24<1)&(K24>=0.85)]= K24[(K24<1)&(K24>=0.85)]-0.85+0.1

K24

K25= as.matrix(mydata2[22,])

K25 [K25<0.75]= K25 [K25<0.75]-0.75-1

K25 [(K25<0.85)&(K25>=0.75)]= K25 [(K25<0.85)&(K25>=0.75)]-0.75

K25 [(K25<1)&(K25>=0.85)]= K25 [(K25<1)&(K25>=0.85)]-0.85+0.1

K25

K26= as.matrix(mydata2[23,])

K26 [K26<0.70]= K26 [K26<0.70]-0.70-1

K26 [(K26<0.85)&(K26>=0.70)]= K26 [(K26<0.85)&(K26>=0.70)]-0.70

K26 [(K26<1)&(K26>=0.85)]= K26 [(K26<1)&(K26>=0.85)]-0.85+0.1

K26

K27=as.matrix(mydata2[24,])

K27[K27==0.1]=-1

K27

K28=as.matrix(mydata2[25,])

K28[K28==0.1]=-1

K28

K29=as.matrix(mydata2[26,])

K29 [K29<=0.6]= 0.6-K29 [K29<=0.6]-1

K29 [K29>0.6]= K29 [K29>0.6] -0.6

K29

K30=as.matrix(mydata2[27,])

K30 [K30==0.1]=-1

K30

K31=as.matrix(mydata2[28,])

K31 [K31<=0.08]= 0.08-K31 [K31<=0.08]-1

K31 [K31>0.08]= K31 [K31>0.08] -0.08

K31

运算结果为:

K2 = (-1 0.02 -0.98 0.04 0.01)

K3 = (0.01 -1 0.01 -1 0.02) ;

K5= (0.05 -1 0.03 0.04 0.07) ;

K6 = (0.06 0.01 0.07 0.03 0.05) ;

K7 = (3.3 3 4 0.5 3) ;

K8= (3 3 4 1 4) ;

K9 = (3 4 3 1 4) ;

K10 = (0.05 0.07 0.01 -1.02 0.04) ;

K11= (2 5 3 -4 4) ;

K12 = (0.04 -1 0.03 0.02 -1) ;

K13 = (0.03 0.02 -1 0.04 0.01) ;

K14= (0.02 0.01 0.02 0.01 0.02) ;

K15= (0.02 0.04 0.03 0.01 0.03) ;

$K16 = (0.05 \ 0.02 \ 0.1 \ -1 \ 0.05) ;$   
 $K17 = (-1 \ -1 \ 0.05 \ -0.97 \ 0.05) ;$   
 $K18 = (0.05 \ 0.02 \ -1 \ -1 \ 0.05) ;$   
 $K20 = (0.05 \ 0.03 \ 0.05 \ 0.02 \ 0.07) ;$   
 $K21 = (-1 \ 0.09 \ 0.05 \ 0.02 \ 0.05) ;$   
 $K22 = (0.01 \ 0.03 \ -1 \ -1 \ 0.02) ;$   
 $K23 = (0.05 \ 0.01 \ 0.05 \ 0.03 \ 0.05) ;$   
 $K24 = (0.05 \ 0.01 \ 0.05 \ 0.02 \ 0.06) ;$   
 $K25 = (0.05 \ 0.05 \ 0.07 \ 0.01 \ 0.05) ;$   
 $K26 = (0.01 \ 0.01 \ 0.05 \ -1.02 \ 0.01) ;$   
 $K27 = (0.75 \ 0.5 \ 0.75 \ 1 \ 0.75) ;$   
 $K28 = (1 \ 0.75 \ 0.5 \ 1 \ 0.75) ;$   
 $K29 = (-1 \ 0.02 \ -1 \ -0.97 \ -1) ;$   
 $K30 = (1 \ 0.75 \ 0.75 \ 1 \ 0.75) ;$   
 $K31 = (0.02 \ 0.02 \ 0.01 \ 0.04 \ -0.99) 。$

规范化:

$K2[K2>0] = K2 [K2>0]/\max(K2)$   
 $K2 [K2<0] = K2 [K2<0]/(-\min(K2))$   
 $K2$   
 $K3[K3>0] = K3[K3>0]/\max(K3)$   
 $K3[K3<0] = K3[K3<0]/(-\min(K3))$   
 $K3$   
 $K5[K5>0] = K5 [K5>0]/\max(K5)$   
 $K5 [K5<0] = K5 [K5<0]/(-\min(K5))$   
 $K5$   
 $K6[K6>0] = K6 [K6>0]/\max(K6)$   
 $K6 [K6<0] = K6 [K6<0]/(-\min(K6))$   
 $K6$   
 $K7[K7>0] = K7 [K7>0]/\max(K7)$   
 $K7 [K7<0] = K7 [K7<0]/(-\min(K7))$   
 $K7$   
 $K8[K8>0] = K8 [K8>0]/\max(K8)$   
 $K8 [K8<0] = K8 [K8<0]/(-\min(K8))$

K8

$$K9[K9>0]=K9 [K9>0]/\max(K9)$$

$$K9 [K9<0]=K9 [K9<0]/ (-\min(K9))$$

K9

$$K10[K10>0]=K10 [K10>0]/\max(K10)$$

$$K10 [K10<0]=K10 [K10<0]/ (-\min(K10))$$

K10

$$K11[K11>0]=K11 [K11>0]/\max(K11)$$

$$K11 [K11<0]=K11 [K11<0]/ (-\min(K11))$$

K11

$$K12[K12>0]=K12 [K12>0]/\max(K12)$$

$$K12 [K12<0]=K12 [K12<0]/ (-\min(K12))$$

K12

$$K13[K13>0]=K13[K13>0]/\max(K13)$$

$$K13[K13<0]=K13[K13<0]/ (-\min(K13))$$

K13

$$K14[K14>0]=K14 [K14>0]/\max(K14)$$

$$K14 [K14<0]=K14 [K14<0]/ (-\min(K14))$$

K14

$$K15[K15>0]=K15 [K15>0]/\max(K15)$$

$$K15 [K15<0]=K15 [K15<0]/ (-\min(K15))$$

K15

$$K16[K16>0]=K16 [K16>0]/\max(K16)$$

$$K16 [K16<0]=K16 [K16<0]/ (-\min(K16))$$

K16

$$K17[K17>0]=K17 [K17>0]/\max(K17)$$

$$K17 [K17<0]=K17 [K17<0]/ (-\min(K17))$$

K17

$$K18[K18>0]=K18 [K18>0]/\max(K18)$$

$$K18 [K18<0]=K18 [K18<0]/ (-\min(K18))$$

K18

$$K20[K20>0]=K20 [K20>0]/\max(K20)$$

$$K20 [K20<0]=K20 [K20<0]/ (-\min(K20))$$

K20

$K21[K21>0]=K21 [K21>0]/\max(K21)$

$K21 [K21<0]=K21 [K21<0]/ (-\min(K21))$

K21

$K22[K22>0]=K22 [K22>0]/\max(K22)$

$K22 [K22<0]=K22 [K22<0]/ (-\min(K22))$

K22

$K23[K23>0]=K23[K23>0]/\max(K23)$

$K23[K23<0]=K23[K23<0]/ (-\min(K23))$

K23

$K24[K24>0]=K24 [K24>0]/\max(K24)$

$K24 [K24<0]=K24 [K24<0]/ (-\min(K24))$

K24

$K25[K25>0]=K25 [K25>0]/\max(K25)$

$K25 [K25<0]=K25 [K25<0]/ (-\min(K25))$

K25

$K26[K26>0]=K26 [K26>0]/\max(K26)$

$K26 [K26<0]=K26 [K26<0]/ (-\min(K26))$

K26

$K27[K27>0]=K27 [K27>0]/\max(K27)$

$K27 [K27<0]=K27 [K27<0]/ (-\min(K27))$

K27

$K28[K28>0]=K28 [K28>0]/\max(K28)$

$K28 [K28<0]=K28 [K28<0]/ (-\min(K28))$

K28

$K29[K29>0]=K29 [K29>0]/\max(K29)$

$K29 [K29<0]=K29 [K29<0]/ (-\min(K29))$

K29

$K30[K30>0]=K30 [K30>0]/\max(K30)$

$K30 [K30<0]=K30 [K30<0]/ (-\min(K30))$

K30

$K31[K31>0]=K31 [K31>0]/\max(K31)$

$K31 [K31<0]=K31 [K31<0]/ (-\min(K31))$

K31

$K=\text{rbind}(K2, K3, K5, K6, K7, K8, K9, K10, K11, K12, K13, K14, K15, K16, K17,$

K18, K20, K21, K22, K23, K24, K25, K26, K27, K28, K29, K30, K31)

运算结果为:

$$\begin{aligned}
 K2 &= (-1 \ 0.5 \ -0.98 \ 1 \ 0.25) ; \\
 K3 &= (0.5 \ -1 \ 0.5 \ -1 \ 1) ; \\
 K5 &= (0.7142857 \ -1 \ 0.4285714 \ 0.5714286 \ 1) ; \\
 K6 &= (0.8571429 \ 0.1428571 \ 1 \ 0.4285714 \ 0.7142857) ; \\
 K7 &= (0.825 \ 0.75 \ 1 \ 0.125 \ 0.75) ; \\
 K8 &= (0.75 \ 0.75 \ 1 \ 0.25 \ 1) ; \\
 K9 &= (0.75 \ 1 \ 0.75 \ 0.25 \ 1) ; \\
 K10 &= (0.7142857 \ 1 \ 0.1428571 \ -1 \ 0.5714286) ; \\
 K11 &= (0.4 \ 1 \ 0.6 \ -1 \ 0.8) ; \\
 K12 &= (1 \ -1 \ 0.75 \ 0.5 \ -1) ; \\
 K13 &= (0.75 \ 0.5 \ -1 \ 1 \ 0.25) ; \\
 K14 &= (1 \ 0.5 \ 1 \ 0.5 \ 1) ; \\
 K15 &= (0.5 \ 1 \ 0.75 \ 0.25 \ 0.75) ; \\
 K16 &= (0.5 \ 0.2 \ 1 \ -1 \ 0.5) ; \\
 K17 &= (-1 \ -1 \ 1 \ -0.97 \ 1) ; \\
 K18 &= (1 \ 0.4 \ -1 \ -1 \ 1) ; \\
 K20 &= (0.7142857 \ 0.4285714 \ 0.7142857 \ 0.2857143 \ 1) ; \\
 K21 &= (-1 \ 1 \ 0.5555556 \ 0.2222222 \ 0.5555556) ; \\
 K22 &= (0.3333333 \ 1 \ -1 \ -1 \ 0.6666667) ; \\
 K23 &= (1 \ 0.2 \ 1 \ 0.6 \ 1) ; \\
 K24 &= (0.8333333 \ 0.1666667 \ 0.8333333 \ 0.3333333 \ 1) ; \\
 K25 &= (0.7142857 \ 0.7142857 \ 1 \ 0.1428571 \ 0.7142857) ; \\
 K26 &= (0.2 \ 0.2 \ 1 \ -1 \ 0.2) ; \\
 K27 &= (0.75 \ 0.5 \ 0.75 \ 1 \ 0.75) ; \\
 K28 &= (1 \ 0.75 \ 0.5 \ 1 \ 0.75) ; \\
 K29 &= (-1 \ 1 \ -1 \ -0.97 \ -1) ; \\
 K30 &= (1 \ 0.75 \ 0.75 \ 1 \ 0.75) ; \\
 K31 &= (0.5 \ 0.5 \ 0.25 \ 1 \ -1) 。
 \end{aligned}$$

优度计算:

$$X = \alpha \% * \% K$$

X

## 致 谢

在论文完成之际不仅思绪万千，攻读博士学位的这段时间里曾经有过的迷茫、彷徨和执着，最终凝聚成论文终稿。在享受收获喜悦之际，感激之情油然而生。

我首先要由衷地感谢我的恩师赵涛教授。从最初论文的选题、提纲的确定直到每个章节内容的修改，每一次赵老师都以严谨的治学态度并不厌其烦地给予悉心地指导。正是赵老师对科学研究独到的眼光、敏锐的洞察力和认真的探索精神，一步一步地引导我顺利完成论文。在这段日子里，赵老师为人师表的人格魅力和积极乐观的生活态度一直感染着我，这将成为我进行科学研究最大的动力。

在论文撰写期间，杜朴、王国弘等同门师兄弟们给予了我莫大的鼓励和帮助，实验室的师弟师妹们也都给我提出了很多的宝贵建议。另外，博士期间同级的许多同学也给了我热情的帮助，在此一并表示感谢。

感谢多年来父母和公婆给予我默默的支持，感谢我的丈夫杨兆城与我携手共同度过了十几年的风雨，还要感谢我的女儿杨逸菲，是她让我体会到成长的惊喜和做母亲的快乐。正是家人的理解和支持才使我坚定地走到今天，也将是我在今后的人生路上继续拼搏的精神支柱。

最后，感谢所有帮助和支持我的人，正是你们使我充满信心和勇气不断前行，再次表示深深的谢意！

李继宏

2010年11月于天津