



生态集成制造系统： 区域循环经济理论与实践

杨养锋/著



科学出版社

生态集成制造系统： 区域循环经济理论与实践

杨养锋/著

本书由西安文理学院学术专著出版基金和陕西省社科联
优秀研究成果购买项目资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书立足系统工程的思想、理论和方法,综合产业生态学理论、循环经济理论与系统理论的研究成果,提出“能源重化工产业集群生态(绿色)集成制造系统”(EHCIC-GIMS)的概念,并对 EHCIC-GIMS 的相关理论和方法进行了梳理与创新,致力于构建从概念、基本理论到技术方法系统的研究体系。对应内容包括:从哲学层面论证了 EHCIC-GIMS 是区域循环经济的有效实现形式和发展模式;提出了 EHCIC-GIMS 的分析、构建、评价和优化控制整体的理论框架;以榆林锦界生态工业园为研究对象,进行了实证研究;针对资源开发对生态环境破坏的不可再生性,从制度层面提出我国西部资源开发生态补偿法律政策体系构建的初步设想。

本书可以作为区域循环经济研究与规划、系统科学与工程等相关学科专业人员的理论与技术读物,也可供各级区域规划管理部门、生态产业园区规划建设部门的实际工作者学习阅读。

图书在版编目(CIP)数据

生态集成制造系统:区域循环经济理论与实践/杨养锋著. —北京:科学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-03-057636-1

I. ①生… II. ①杨… III. ①循环经济—区域经济发展—研究
IV. ①F062.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 122271 号

责任编辑:王丹妮/责任校对:樊雅琼
责任印制:吴兆东/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 8 月第一次印刷 印张:11 5/8

字数:275 000

定价:86.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

谨以此书献给我的妻子、我们的父母，以及祝贺党的
十九大胜利召开

前言

自 20 世纪中叶以来，全球性的人口膨胀、资源短缺、环境恶化、生态破坏、气候变化已经成为制约人类社会发展的关键，追求“人类与自然的协同进化与和谐共存”已经成为人类矢志不渝的理想，切实贯彻执行可持续发展战略已经成为全球人类共同奋斗的目标。

在人类历史上，制造业创造了大量物质财富，为人类作出了巨大贡献。特别是工业革命以来，由于科学技术的进步，生产力获得了飞速的发展，人类利用自然的能力急速提高，开发自然的规模空前扩大，创造了人类历史上前所未有的财富积累与高速的经济增长。但在生态环境方面却付出了沉重的代价，厄尔尼诺现象、全球气候变暖、南极上空臭氧层空洞的不断扩大、各类频繁发生的自然灾害、能源危机等全球性问题及区域性环境灾难频发事件均反映了制造业活动尤其是能源重化工业（指能源工业、重工业和化学工业）活动对人类生存环境及人类身体健康产生的巨大负面影响。其中全球气候变暖是人类迄今面临的最重大环境问题，也是 21 世纪人类社会可持续发展面临的严峻挑战。

2010 年，中国超过日本成为世界第二大经济体；2013 年，中国超过美国成为世界第一大货物贸易国。与此同时，根据国际能源机构的最新数据，截至 2011 年，中国二氧化碳排放量达到 80 亿 t，已占到全球碳排放总量的 25.5%，即四分之一，超过美国碳排放量 50%，被国际社会认为是世界上最大的碳排放国。2013 年初以来，我国多次出现持续性、大面积雾霾，覆盖全国 25 个省区市、100 多个城市，受影响人口约 6 亿人。雾霾中的 $PM_{2.5}$ 成为最新的健康杀手和人民群众的“心肺之患”。笼罩全国五分之一国土的雾霾，形成了全球最大规模的环境灾难，使中国成为国际社会高度关注的焦点。除了雾霾外，我国土壤、水污染同样严重。2014 年 5 月 15 日，国际低碳经济研究所发布的相关报告以“中国已成为污染大国”为题，列举了如下事实：中国各类污染物排放量均居世界首位，并远远超过自身的环境容量极限。目前，中国消费了世界约 21% 的能源、11% 的石油、49% 的煤炭，排放了占世界 26% 的二氧化硫、28% 的氮氧化物、25% 的二氧化碳。在土壤污染方面，2014 年 4 月环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示，全国耕地的污染超标率为 19.4%，而土壤总的超标率为 16.1%，其中 1.1% 为重度污染，而我国南部和西南部的土壤污染更为严重。在水污染方面，2012 年，全国十大水系、62 个主要湖泊分别有 31% 和 39% 的淡水水质达不到饮用水要求，

严重影响人们的健康、生产和生活。目前, 全国有 2.8 亿居民使用不安全饮用水。《2012 中国环境状况公报》显示, 全国 198 个地市级行政区中, 近六成地下水水质较差或极差^①。

面对如此严峻的生态环境现状, 最根本的原因是我国工业化进程加速推进, 特别是能源重化工产业的快速发展, 因此, 有些经济学家认为, 我国应该绕开重化工阶段。重化工阶段会带来很多问题, 但是对中国这样拥有 14 亿人口的大国来说, 这个阶段是绕不过去的, 因为要成为世界经济强国, 必须有自己独立的工业体系, 必须有具有自己创新能力的装备制造业。同时, 居民消费结构升级、城市化进程加快、基础设施建设和由国际产业分工导致的国际制造业转移等中长期因素, 决定着我国重化工业时期将持续较长时间。另外, 从中国现代化推进的动力机制分析, 中国要成为世界经济强国离不开能源重化工产业的发展, 制造业和基础产业是中国经济的两个支撑点, 能源产业和原材料产业是基础产业的基础。在制造业方面, 中国亟须发展设备制造产业和基础装备制造产业, 而中国基础产业的发展也离不开能源重化工产业的发展。从我国现实发展来看, 能源产业是现在最大的瓶颈, 而能源的核心是石化工业, 泱泱大国依赖别人是解决不了能源问题的; 从原材料产业来看, 我国尚未完成城市化, 要完成城市化, 必须依赖钢材水泥等的发展; 同样, 基础设施、交通运输、环境产业更要依赖能源重化工业的发展, 能源重化工业越发达, 环境工业才可能发达。因此, 唯有大力推动能源重化工业, 才能推进中国的现代化。

我们现在讨论的问题不是能源重化工产业要不要发展, 而是怎样发展。粗放型的增长方式, 造成我们现有的不少能源重化工业高污染高能耗, 但这只是增长方式问题, 而不是能源重化工业本身的问题。我们现在所要说明的是能源重化工业的发展, 应当被置于科学发展观下重新考虑它的发展之路。现在我国能源重化工业的发展必须解决两个方面的问题: 一是降低能耗; 二是降低污染。第一个问题必须依靠技术进步来解决; 第二个问题必须依靠转变经济增长方式来解决。如何转变经济增长方式? 就是要改变目前粗放的、线性的经济增长方式, 树立可持续发展思想, 走循环经济的发展模式, 实现对能源重化工业产业的生态化改造。发展循环经济, 在实践操作方面必须明确一个基础, 解决两个问题。明确一个基础, 就是循环经济的发展必须以企业清洁生产或企业的绿色制造为基础, 可以说没有企业层面的清洁生产, 就没有区域层面的循环经济, 因为循环经济的微观主体是企业, 本质上讲循环经济就是将企业清洁生产在区域层面进一步集成, 使其产生更大的生态环境规模效益。两个问题: 一是循环

① 章轲. 2014-05-22. 中国污染到底有多重? 污水总量超环境容量三倍. <http://env.people.com.cn/n/2014/0522/c1010-25049637.html>.

经济发展切入点的定位选择决定并非所有的行业和产业都适合发展循环经济,循环经济本质属性和自身特点决定了其对产业和行业的选择具有较为苛刻的条件,如要求产业的关联度高、产业间互补性强、产业的规模效益显著、环境的负输出强等,而能源重化工产业高能耗、高污染、高投资、大规模的产业特点,决定了它是发展循环经济的首选行业;二是循环经济实施的产业组织形式和空间布局条件是否具备,循环经济的发展不是针对单个企业而言的,而是针对区域发展而言的,因为单个企业实施循环经济要付出较高的企业成本,且难以发挥生态环境的规模效益,不能明显改善区域的生态环境压力。因此发展循环经济,要求产业的空间布局要相对集中,产业间关联度和互补性要强,而满足这一空间布局条件的产业组织形式就是产业集群,产业集群的集聚效应有可能使能源重化工产业在较短的时间内实现规模经济和范围经济,集聚效应也会促使资本、信息、人力资源等生产要素产生裂变,放大对能源重化工产业发展的推力,同时产业集群在地理空间上高度集中的特点,为其实施循环经济提供了条件、奠定了基础。

正是基于以上分析,本书依据循环经济和系统工程的理论与方法,先建立了能源重化工产业集群生态集成制造系统,并进行了实证研究,又从制度层面给出了我国西部资源开发生态补偿法律政策体系构建的初步设想。能源重化工产业集群生态集成制造系统,根据绿色即生态的一般理解,也可称为能源重化工产业集群绿色集成制造系统(green integrated manufacturing system of energy and heavy chemical industrial cluster, EHCIC-GIMS),本书在写作过程中采用第二个概念。通过对 EHCIC-GIMS 的构建实现对能源重化工产业集群的生态化改造,是对循环经济在中观区域层面实践发展模式的一种探索。本书共六篇,第一篇,理论基础篇。分别对产业生态学、循环经济和系统动力学相关理论方法研究进行了系统的回顾与梳理,又从哲学层面论证了可持续发展思想和科学发展观形成的历史科学性,分析了人类社会可持续发展的路径选择。第二篇, EHCIC-GIMS 系统构建篇。首先,对 EHCIC-GIMS 的概念、内涵及特征进行了界定;其次,对 EHCIC-GIMS 的要素、结构、功能及集成效应进行了分析,给出了 EHCIC-GIMS 的研究框架;最后,从系统集成分析、生态产业链(网)设计、系统集成在生态产业链(网)设计中的应用等方面实现对 EHCIC-GIMS 的构建。第三篇, EHCIC-GIMS 系统评价篇。基于能值分析与系统理论给出了 EHCIC-GIMS 的评价体系。第四篇, EHCIC-GIMS 系统优化控制篇。构建了水资源和环境系统的系统动力学仿真模型,实现了对系统的评价、优化和控制。第五篇,实证研究篇。以榆林锦界能源重化工产业园为研究对象,分别对 EHCIC-GIMS 的系统构建、评价和优化控制进行了实证研究。第六篇,制度研究篇。依据系统理论,对资源开发生态补偿机制进行了系统研究,提出了我国西部资源开发生态补偿

法律政策体系构建的初步设想。

作为一部专门研究区域循环经济理论与实践的专著，由于研究对象属于经济社会复杂巨系统，覆盖面广，涉及问题多，定量难度大，限于篇幅，本书可能会有疏漏；由于经济社会复杂巨系统研究是一个难度较大的新领域，属于交叉学科，具有跨学科融合的显著特征，因此，本书难免有不当之处，敬请批评，容以后再版时修正。

杨养锋

2018年4月于西安

目 录

第一篇 理论基础

第 1 章 产业生态学理论	3
1.1 能值理论的基本概念和原理	4
1.2 关键种理论	10
1.3 食物链及食物网理论	11
1.4 生态位理论	11
1.5 生态系统多样性	12
1.6 生态系统耐受性	12
第 2 章 循环经济理论	14
2.1 工业代谢分析	14
2.2 物质流分析	16
2.3 量质分析	17
第 3 章 系统动力学理论	19
3.1 系统动力学的内涵	19
3.2 建立系统动力学模型的原则与步骤	19
第 4 章 人类社会可持续发展的路径选择	27
4.1 资源演化系统模型	27
4.2 资源的新概念和特征	28
4.3 资源演化系统的动力机制	29
4.4 人类社会实现可持续发展的路径选择	31
4.5 EHCIC-GIMS 是区域层面循环经济发展的一种有效模式	35

第二篇 EHCIC-GIMS 系统构建

第 5 章 EHCIC-GIMS 的基本理论及研究框架	39
5.1 EHCIC-GIMS 的基本理论	39
5.2 EHCIC-GIMS 的研究框架	50
第 6 章 EHCIC-GIMS 的构建	53
6.1 系统集成分析与生态产业链(网)的关系	53
6.2 系统的集成分析	54

6.3	生态产业链的设计	61
6.4	生态产业网的设计	63
6.5	系统集成分析和生态产业链（网）设计理论的应用	70

第三篇 EHCIC-GIMS 系统评价

第 7 章	基于能值理论的 EHCIC-GIMS 评价	77
7.1	EHCIC-GIMS 能值分析评价研究	77
7.2	能值理论评价的不足之处	79
第 8 章	基于系统理论的 EHCIC-GIMS 系统评价研究	81
8.1	评价指标体系的设计原则	81
8.2	指标体系框架设计	82
8.3	评价分析	93

第四篇 EHCIC-GIMS 系统优化控制

第 9 章	基于水资源系统的 EHCIC-GIMS 的优化和控制	97
9.1	模型总体结构	97
9.2	模型因果关系图	98
9.3	水资源系统各子系统流图及方程式	99
9.4	模型检验	104
第 10 章	基于环境系统的 EHCIC-GIMS 的优化和控制	105
10.1	模型总体结构	105
10.2	模型因果关系图	106
10.3	环境系统各子系统流图及方程式	107
10.4	模型检验	115

第五篇 实证研究

第 11 章	锦界 EHCIC-GIMS 的构建	119
11.1	区域概况	119
11.2	系统集成分析	120
11.3	系统设计	125
11.4	系统实现	130
第 12 章	锦界 EHCIC-GIMS 系统的能值评价	132
12.1	能值计算	132
12.2	结果分析及建议	133

第 13 章 基于水资源系统的锦界 EHCIC-GIMS 的优化和控制	135
13.1 区域水资源的供给现状	135
13.2 系统仿真	136
13.3 结果分析	137
13.4 政策建议	139
第 14 章 基于环境系统的锦界 EHCIC-GIMS 的优化和控制	141
14.1 区域内环境现状	141
14.2 系统仿真	144
14.3 结果分析	145
14.4 政策建议	146

第六篇 制度研究

第 15 章 我国西部资源富集区资源开发生态补偿机制研究	149
15.1 我国西部资源富集区资源开发生态补偿机制建立的必要性及 意义	149
15.2 资源开发生态补偿机制及要素分析	151
15.3 我国西部资源开发生态补偿法律政策体系构建设想	154
参考文献	169

第一篇 理论基础

第 1 章 产业生态学理论

产业生态学起源于 Robert Frosch 和 Nicolas Gallopoulos 模拟生物新陈代谢和生态系统再生过程所开展的“产业代谢”研究，他们在《可持续工业发展战略》（1989 年，发表于 *Scientific American*）一文中首次提出“产业生态系统”的概念，并受到广泛关注。1996 年，Judy L. Meyer 在美国生态学会第 81 届年会上将产业生态学列为未来生态学发展的 5 个前沿领域之一。1997 年，由耶鲁大学和麻省理工学院联合出版了全球第一份关于产业生态的学术期刊——《产业生态学》，标志着产业生态学作为一门真正意义上的学科为学术界所接受。

美国国家科学院于 1991 年将产业生态学定义为“是对各种产业活动及其产品与环境之间相互关系的跨学科研究”^[1]。电气和电子工程师协会（Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE）在《可持续发展与产业生态学白皮书》（1995 年）中，对产业生态学的定义作了如下界定：“产业生态学是对产业和经济系统及其与基本的自然系统间相互关系的跨学科研究”^[2]。它可被看作“可持续性的科学”。《产业生态学》杂志主编 Lifset 于 1997 年在发刊词中提出：“产业生态学是一门迅速发展的系统科学分支，它从局部、地区和全球三个层次上系统研究产品、工艺、产业部门和经济部门中的能量流和物质流，其焦点是研究产业界在降低产品生命周期过程中的环境压力的作用。产品生命周期包括原材料采掘与生产、产品制造、产品使用和废弃物管理。”^[3,4]

耶鲁大学 Thomas Graedel 教授与 AT&T 公司 B. R. Allenby 在《产业生态学》教材中对于 1995 年提出的概念进行了完善：“产业生态学是人类在经济、文化和技术不断发展的前提下，有目的、合理地去探索和维护可持续发展的方法。它要求不是孤立而是协调地看待产业系统与其周围环境的关系。这是一种试图对整个物质周期过程——从天然材料、加工材料、零部件、产品、废旧产品到产品最终处置——加以优化的系统方法。需要优化的要素包括物质、能量和资本。”中国著名学者王如松认为：产业生态学是一门研究社会生产活动中自然资源从源、流到汇的全代谢过程，组织管理体制及生产消费，调控行为的动力学机制，控制论方法及其与生命支持系统相互关系的系统科学。

综上所述，对于如何定义产业生态学的基本观点，我们可以看到其中的共通之处：第一，产业生态学是将自然界生物系统的有机循环机理引入产业经济的研究而形成的新兴的交叉边缘学科，它不是生态学与经济学的简单叠加，而是相互

渗透与融合，是一种有机结合；第二，产业生态学是研究产业活动及经济行为与自然环境之间的关系，并据此对产业生产的全过程进行优化的应用型学科；第三，对产业生态的研究最终是为了增强经济系统对生态环境的适应性，进而实现人类社会的可持续发展。

目前，产业生态学的研究方法较多，生命周期评价（life cycle assessment, LCA）、系统分析、总成本评估（total cost assessment, TCA）、有效能量（exergy）分析、能值评估是较为重要的五种^[5,6]。LCA 和系统分析是产业生态研究中的两种最基本的研究方法。中国环境科学学会持久性有机污染物专业委员会对 LCA 的概念作了明确的界定。系统分析则是对系统组成之间的关系进行量化的数学模型，它建立在系统分析各组成成分关系的基础上，研究范围可大可小。虽然这些方法被广泛使用，但是在应用上它们都有着各自的局限性。例如，LCA 和系统分析在对各种物质、能量、排放及环境影响进行统一评价与对比时就缺少一个统一的尺度平台；在进行广义生态学的研究时，TCA 无法解决经济上的最佳决策往往偏离环境偏好的矛盾；有效能量分析可以有效地评价系统内能量利用效率和提高的可能性，但是无法与环境影响或生态系统直观地联系起来，只能提供一种估计。

1.1 能值理论的基本概念和原理

1.1.1 能值的概念

能值（emergy）是一个新的科学概念和度量标准，由美国著名生态学家 H. T. Odum 创立。1978 年，H. T. Odum 将能值定义为一种流动或储存的能量所包含另一种类别能量的数量。他还进一步解释能值为产品或劳务形成过程直接或间接投入应用的一种有效能总量，就是其所具有的能值^[7]。

能值实质就是包含能量，任何形式的能量均源于太阳能，所以常以太阳能为基准来衡量各种能量的能值^[8]。任何资源、产品或劳务形成所需直接或间接应用的太阳能，就是其所具有的太阳能值（solar emergy），单位为太阳能焦耳（solar emjoules, sej）。实际应用的是太阳能值转换率，即单位能量或物质相当于多少太阳能焦耳的能值转化。若形成 1J 木材的能量需要 34 900sej 转化，那么木材的能值转换率就是 34 900sej/J。以能值为基准，可以衡量和比较生态系统中不同等级能量的真实价值与贡献^[9]。

1.1.2 能值分析

能值分析是以能值为基准，把生态系统或生态经济系统中不同种类、不可比较的能量转换成同一标准的能值来衡量和分析，从中评价其在系统中的作用和地

位；综合分析系统中各种生态流（能量流、物质流、货币流、人口流和信息流），得出一系列能值指标（emergy indices），从而定量分析系统的结构功能特征与生态经济效益^[10]。

对自然资本服务流的估价与经济中的合计花销或国民生产总值（gross national product, GNP）之间没有必然的联系。生态服务对人类福利的贡献很大一部分只具有纯粹公益性质，他们根本不通过货币经济而直接增加人类的福利^[11]。因此，20世纪30年代初开始尝试应用能量价值理论方法来分析研究自然生态系统的物质循环和信息传递。生态系统的能量输入、输出，以及其在系统各组分间的流动，是生态系统最基本的功能过程之一。虽然能量分析在对生态经济系统的功能研究中作出了贡献，但是也遇到了难题，除了各种辅助能的能量折算难以确定外，最突出的问题是不同类别、不同能质（energy quality）等级的能量不能简单地加减和比较。20世纪80年代，H. T. Odum提出了能值理论和方法，可将生态经济系统内流动和储存的各种不同类别的能量和物质转换为同一度量标准太阳能，从而定量分析研究自然资源的利用状况和评估国家经济方针的制定效果，判断人与自然的可持续发展状态。

1.1.3 能值转换率

能值转换率是从生态系统食物链和热力学原理引申出来的重要概念。它是衡量不同类别能量的能质的尺度，与系统的能量等级（energy hierarchy）密切相关。生态系统是一种自组织（self-organization）的能量等级系统。能量在食物链中传递、转化的每一过程中，根据热力学第二定律均有许多能量耗散流失，因此，能量从低等级的太阳能转化为较高等级的绿色植物的潜能，再传递、转化为更高等级、更为密集的各级消费者的能量；能量数量的递减伴随着能质和能级的增加。应用能值转换率可将生态系统或生态系统内流动和储存的各种不同类别的能量转换为同一标准的能值，而进行定量分析研究。

环境中主要能量流动过程的太阳能值转换率的计算方法包括：从地球生物圈能量等级分布网中获取数据进行计算；通过对亚系统能量流动和转化进行分析；通过能量储存时间进行分析计算；通过其他太阳能值转换率进行转换推算；通过能量流动网络数据计算；通过计算机解矩阵方程计算；通过能量等级分布图计算；通过物质再生周期计算等。

H. T. Odum从地球作用的角度，换算出自然界和人类社会中主要能量类型的太阳能值转换率，见表1.1。

表 1.1 几种主要能量类型的太阳能值转换率

能量类型	太阳能值转换率 (sej/J)
太阳	1
风动	623
有机物质	4 420
雨水势能	8 888
雨水化学能	15 423
河流势能	23 564
河流化学能	41 000
海浪、海潮机械能	17 000~29 000
燃料	18 000~58 000
食品、果菜、粮食、土产品	24 000~200 000
高蛋白食物	1 000 000~4 000 000
人类劳务	80 000~5 000 000 000
资料信息	10 000~10 000 000 000 000

1.1.4 能值指标体系

各种生态系统和复合生态系统的能值分析，包括生态经济系统、社会-经济-自然复合生态系统及各种生态工程系统的能值分析，均可得出一系列能值指标。这些指标综合反映生态系统的结构、功能与效率；它们是反映自然环境资源的价值和人类社会经济发展，以及环境与经济、人与自然关系的指标体系，也是系统综合分析及社会经济发展决策参考的重要指标，通过系统能值分析得出的一系列能值指标，可把复合生态系统的各种生态流（能量流、物质流、货币流、信息流、人口流或生物物种流等）在能值尺度上统一起来，定量分析系统的结构和功能，认识自然环境生产的价值及其与人类经济的关系，正确处理人与自然资源和环境与经济的关系，走可持续发展的道路。

1. 能值投资率

生态经济系统（环境经济系统）的能值投资率（emergy investment ratio, EIR），等于来自经济的反馈能值除以来自环境的无偿能值输入。前者如燃油、电力、物资、劳务等，均需花钱购买，称为“购买能值”（purchased emergy）；后者来自包括土地、矿藏等不可更新资源和太阳能、风、雨等可更新资源在内的自然界无偿能值（free emergy）。能值投资率也可称为“经济能值/环境能值比率”。