

The Study on
Circular Economy and
Indicator System Based
on ECECA

循环经济指标体系

——生态累计焔理论与案例

孙振清◎著

中国环境科学出版社

循环经济指标体系

——生态累计焔理论与案例

孙振清◎著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

循环经济指标体系——生态累计熵理论与案例/孙振清
著. —北京: 中国环境科学出版社, 2010

ISBN 978-7-5111-0370-3

I. ①循… II. ①孙… III. ①自然资源—资源
经济学—研究 IV. ①F062.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 181215 号

责任编辑 周艳萍
责任校对 扣志红
封面设计 金 喆

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
010-67112738 (图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2011 年 5 月第 1 版
印 次 2011 年 5 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 13.5
字 数 250 千字
定 价 35.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

序 言

循环经济是在有限资源和环境容量的地球生态系统内，实现经济社会可持续发展的主要经济模式，强调的是资源的循环利用、高效利用和环境负担最小化。发展循环经济是我国节约资源、保护环境，建设资源节约型和环境友好型社会的必然选择；同时，也与当前全球应对气候变化、发展低碳经济的目标一致，并对发展循环经济赋予了新的要求。2009 年底，我国政府对外公布了 2020 年单位国内生产总值的二氧化碳排放强度比 2005 年降低 40%~45%的自主减排行动目标。在“十二五”规划中又进一步制定了到 2015 年单位国内生产总值能源消耗降低 16%、二氧化碳排放降低 17%，以及主要污染物排放总量下降幅度等约束性指标。这些指标的提出，为我国发展循环经济、推动经济社会的可持续发展又明确了新的目标，指明了努力方向。

经过多年的理论研究和实践发展，我国已基本形成了较为完善的循环经济理论体系，建设了一批循环经济试点城市和试点产业园区，在城市建设规划和产业发展规划中更加注重产业链上下游的衔接和资源的有效配置。1990—2009 年，我国单位国内生产总值的二氧化碳排放强度下降了 55%，下降速度为世界罕见。工业固体废物综合利用率，由 1990 年的 29.3%增加到 2009 年的 67.8%，“三废”综合利用产值由 1990 年的 64 亿元增加到 2009 年 1 608 亿元，增长了 24 倍。在资源节约、保护环境、减缓碳排放方面取得了显著成效。

当前我国社会经济的可持续发展，既面临国内资源保障和环境容量的瓶颈性制约，也面临全球应对气候变化、减缓碳排放的严峻挑战。节约资源、保护环境，实现绿色、低碳发展，是我国统筹国内可持续发展与应对全球气候变化的战略选择，也是我国转变发展方式的核心内容。“十二五”期间是我国实现经济发展方式根本性转变的关键时期，要充分利用和发展我国循环经济的理论基础与实践经验，在新的形势下，进一步完善循环经济的评价指标体系，加强发展循环经济的政策导向和实施力度。充分发挥循环经济与减缓碳排放、实现绿色低碳发展的协

同效应，使循环经济的发展更加注重和促进节能与减少二氧化碳排放，使之成为促进国内经济社会可持续发展与应对全球气候变化双重目标实现的有效途径。

本书用热力学理论诠释了循环经济的概念，建立了基于生态累计熵循环经济评价指标体系，并对企业、产业园区和地区的循环经济发展状况进行了研究和分析。对于政府相关部门、企业、学者和公众了解循环经济的内涵，推进循环经济的实践，本书提供了有益的启示，具有一定的参考价值。

清华大学原常务副校长，管理科学与工程专业教授、博士生导师

清华大学低碳能源实验室主任

中国气候变化专家委员会副主任

中国能源研究会副理事长兼能源系统工程专业委员会主任

国家科技部“十一五”科技支撑计划相关重大项目专家组组长

973 项目首席专家



2011 年 3 月 18 日

前 言

发展循环经济是我国政府为解决资源和环境问题提出的战略举措，也是建设资源节约型和环境友好型社会、落实科学发展观、实现可持续发展的重要手段。但是，由于对循环经济基本理论和基本概念理解上的偏差，造成建设循环经济重点的迷失，很可能产生不必要的损失。为此，澄清基本概念、理清基本思路是目前循环经济建设必须要首先解决的问题。在此基础上以科学发展观为指导，建立符合我国国情并能促进环境保护及资源高效利用的循环经济指标体系，将具有重要的现实意义。

本书对循环经济中常用的资源、生产、消费、废弃物等概念从热力学角度进行诠释，分析了完全循环的理论和现实可实现性问题，并从能流、物流和经济学的角度对循环经济的循环机理进行研究，找出影响循环的主要因素和解决途径，使得循环经济建设理论依据更加充实。

通过对能值分析、熵分析以及物流分析研究，结合国外学者研究的成果，提出生态累计熵分析（ECECA）的方法。研究认为，此方法能够弥补以前研究方法的缺陷，能够对循环经济实施效果从经济、资源、环境等方面综合考察。论文基于生态累计熵分析方法建立了循环经济指标体系，并用此指标体系对钢铁企业和铝业生态工业园区以及河北省的循环经济进行了具体的研究，提出了研究循环经济的新视角，给出了建设循环经济的具体建议和意见。

Preface

Development of circular economy (CE), or recycling economy as is also termed, has been proposed as an important strategic option for addressing the emerging challenges from resource exploration and environmental preservation, and considered as a necessary response measure for building a conservation-minded and economically sustainable society. However, the apparent discrepancies or divergences in the understanding of some fundamental theories or basic concepts related to CE may negatively affect a reasonable or realistic development of this subject under the country's specific conditions, or even worse cause any unintended socio-economic loss. So it is therefore above all to establish a set of clear and consistent ideas of the CE fundamentals, and then, on this basis, it would be of more practical meaning to work out, guided by the concepts of scientific development, a new indicator system consistent with the national conditions and favorable for a good measure of resource recycling and environment protection levels.

Some commonly used concepts in the CE, such as resource, production, consumption and waste, have been well expounded in this book, unusually from a thermodynamic point of view, with the ideas of resource consumption and possession made clearer by employing the exergy theory. An analysis of complete recycling theory and practical possibility has been presented in detail, and the recycling mechanism of CE has been discussed from the standpoint of energy flow, material flow and cash flow. The dominant factors affecting the recycling process and possible solutions have been identified, thus making the CE premise and theory well-founded and widely applicable.

More important in this dissertation is the evaluation method of ecological cumulative exergy consumption (ECEC) advanced through the assessment of emergy analysis (EmA), exergy analysis and material flow analysis (MFA), and on the basis of the latest international research outputs. It is pointed out that this brand-new approach is developed in response to the apparent deficiencies existing in the previous CE study and practice, and evaluates the real effect of CE-related programs from all the

aspects of economy, resource and environment. Furthermore, the CE evaluation indicator system based on the ECEC has been developed for practical use, and applied to assessing the case study in the steel-iron complex, aluminum eco-industrial park as well as CE implementation in Hebei province, and proposed constructive advice for future healthy development in a fresh view point.

缩略词表

缩略语	中文	英文
3R	减量化, 再利用, 资源化 (循环利用)	Reduce, Reuse, Recycle
4R	减量化, 再利用, 资源化 再组织	Reduce, Reuse, Recycle, Reorganize
5R	减量化, 再利用, 资源化, 维修, 再认识	Reduce, Reuse, Recycle, Repair, Rethinking
CDP	累计完美度	Cumulative Degree of Perfection
CE	循环经济	Circular Economy (国际常用说法), 也称 Recycling Economy
CEC	累计焓消耗	Cumulative Exergy Consumption
DALY	伤残调整寿命年	Disability Adjusted Life Year
DPO	国内过程产出	Domestic Processed Output
EA	能量分析	Energy Analysis
ECEC	生态累计焓	Ecological Cumulative Exergy Consumption
ECECA	生态累计焓分析	Ecological Cumulative Exergy Consumption Analysis
EISD	可持续发展 ECEC 指标	ECEC Index of Sustainable Development
ELR	环境负荷率	Environment Load Ratio
EmA	能值分析	Emergy Analysis
ExA	焓分析	Exergy Analysis
EYR	ECEC 产出率	ECEC Yield Ratio
GDP	国内生产总值	Gross Domestic Product
IE	产业生态学	Industry Ecology
I-O	投入产出	Input-Output
ISD	可持续发展指数	Index of Sustainable Development
LCA	寿命周期分析	Life Cycle Analysis
MFA	物质流分析	Material Flow Analysis and Accounting
MIPS	单位服务的物质投入	Material Input Per Unit of Service

SCOPE	环境问题委员会	Scientific Committee on Problems of the Environment
UNCSD	联合国可持续发展委员会	United Nations Commission on Sustainable Development
UNSTAT	联合国统计署	Statistical Division of the United Nations
WHO	世界卫生组织	World Health Organization
YLD	失能所致的残疾生存年	Years Lived With Disability
YLL	寿命损失年	Years of Life Lost

单位符号表

kgce	千克标准煤, 1 kgce 发热量为 29.27 MJ=7 000 kcal
tce	吨标准煤
GJ	吉焦=10 ⁹ 焦耳
seJ	太阳能焦耳 (solar emjoules), 以太阳能值 (Solar Emergy) 来衡量某一能量的能值大小的单位
K	热力学温度又称开尔文温度, 单位为 K, 绝对零度时的温度定义为 0 K。水的三相点, 即液体、固体、气体状态的水同时存在的温度, 定义为 273.16 K。
mol	摩尔, 是一系统的物质的量。1 摩尔物质, 指该系统中所包含的该物质的基本单元数为 6.022×10^{23} 个。
hm ²	公顷, 1 hm ² =10 ⁴ m ² =15 亩

目 录

第1章 概 述	1
1.1 研究目的	1
1.2 研究意义	3
1.3 研究方法	4
1.4 本书结构	5
第2章 国内外对循环经济的研究	7
2.1 国内外对循环经济的认识	7
2.2 循环经济与产业生态学	11
2.3 循环经济原则	14
2.4 循环经济的再认识	15
2.5 本章小结	18
第3章 循环经济基本概念的再认识	20
3.1 资源	20
3.2 生产	26
3.3 消费	29
3.4 以炯的观点对资源循环利用的理解	35
第4章 废弃物	39
4.1 废弃物的描述	39
4.2 废弃物产生的必然性和可避免性	45
4.3 资源被放错的原因	48
4.4 避免废弃物产生的措施	52
第5章 循 环	56
5.1 循环的局限性	56

5.2 循环的物流能流分析	60
5.3 循环的经济学分析	68
5.4 循环经济是博弈的结果	74
第 6 章 生态累计焓	77
6.1 方法学概述	77
6.2 能量、能值和焓	79
6.3 焓分析	81
6.4 生态累计焓分析法	83
6.5 ECEC 计算	90
6.6 投入产出方法的引入	99
第 7 章 循环经济指标体系	105
7.1 指标描述	106
7.2 可持续发展指标体系综述	109
7.3 循环经济指标	112
7.4 基于 ECECA 循环经济指标体系	117
第 8 章 企业案例	128
8.1 生态累计完美度的计算	128
8.2 MFA、焓和能量分析的对比	132
8.3 ECECA 与其他方法对比	134
8.4 钢铁企业的综合评价	137
8.5 工业园区综合评价	139
8.6 总结	143
第 9 章 河北省案例分析	144
9.1 河北省情概述	144
9.2 河北省可持续发展能力分析	149
9.3 河北省发展循环经济的建议和思考	154
第 10 章 结 论	162
10.1 论文研究过程和主要结论	162

10.2 政策建议	163
10.3 进一步研究的设想	166
参考文献	167
附录 A 钢铁冶炼过程各工序能耗	176
附录 B 河北省案例中涉及的数据及指标	184

表索引

表 2-1 生态系统和工业系统比较表	13
表 3-1 资源类型	25
表 3-2 高炉生产 1 t 钢所需原料 (2004 年中国重点企业)	34
表 4-1 反应中的焓值及摩尔重量	47
表 4-2 环境问题与工业界满足人类需求方法的联系	51
表 5-1 非可再生物质循环类型的分类	57
表 5-2 1990 年西德物流情况表	60
表 6-1 能量、焓和能值的特点	80
表 6-2 能值定义的演变	85
表 6-3 全球能值核算表	86
表 6-4 四次伦敦烟雾事件的比较	97
表 6-5 污染物的 DALY 及其 ECEC 参数	97
表 6-6 能量投入产出	100
表 6-7 过程的投入产出表	101
表 7-1 SCOPE 提出的可持续发展指标体系	110
表 7-2 资源持续利用评价指标体系	113
表 7-3 循环经济评价指标体系	114
表 7-4 总体指标	122
表 7-5 分系统指标体系	122
表 7-6 循环经济指标体系	122
表 7-7 某钢铁厂生产过程中的 ECEC 流及完美度表	123
表 8-1 某企业炼焦过程的焓和 ECEC 流表	131
表 8-2 MFA 和焓分析能量指标对比分析表	133

表 8-3	MFA、熵分析和 ECEC 分析结果对比	135
表 8-4	有害物质造成的 ECEC 损失表	138
表 8-5	钢厂可持续发展指标表	139
表 8-6	ECEC 指标评价表	142
表 8-7	MFA 的主要指标	142
表 8-8	企业指标评价表	143
表 9-1	河北省主要资源储量情况	145
表 9-2	河北省经济、环境现状表 (2004 年)	146
表 9-3	2000—2004 年经济增长与污染物生产及排放关系	147
表 9-4	河北省经济—环境—资源近期和长期发展目标	148
表 9-5	河北省资源利用评价指标	150
表 9-6	河北省废弃物利用主要指标	151
表 9-7	河北省可持续发展能力指标表	152
表 9-8	2000—2004 年河北省经济及污染物产生及排放在全国的位次	155
表 9-9	河北省可持续发展能力在全国的位次	156
表 9-10	河北、北京、天津产业结构及河北省在全国的位次	158

图索引

图 1-1	本书研究结构图	5
图 2-1	循环经济与知识经济的关系	12
图 2-2	3R 原则实施次序图	14
图 2-3	不同级别的物流规模	17
图 3-1	以熵和物质流表示的生产过程	27
图 3-2	资源利用与资源枯竭脱钩策略图	32
图 3-3	钢铁生产简单流程图	33
图 3-4	基于熵流的经济活动分解	36
图 4-1	废弃物形成过程示意图	41
图 4-2	人类对自然态度的转变	49
图 5-1	物流流程图	61
图 5-2	产品生命周期, 物流平衡及价格	70
图 5-3	政府与企业博弈图	75
图 6-1	物流、能流核算方法示意图	84

图 6-2 能值和焓函数示意图.....	85
图 6-3 不同生产流的能值比较	93
图 6-4 ECO-indicator 99 方法中的影响类别指标图.....	98
图 6-5 过程示意图	101
图 7-1 循环经济物流及价值流模型	119
图 7-2 指标体系框架	120
图 7-3 企业 ECEC 涉及各参数关系示意图.....	125
图 8-1 产品的不同生产方式示意图	130
图 8-2 联合生产的能流、能值、能值转换率示意图	130
图 8-3 不同方法下物料比重变化图	136
图 9-1 河北省资源—环境—经济关系图	147
图 9-2 河北省 2003 年物流全景图	149
图 9-3 指标示意图	151
图 9-4 2000—2003 年河北省主要指标图	154
图 9-5 北京、天津、河北迁入人员受教育程度对比	158

附表索引

表 A-1 煤炭开采焓消耗.....	176
表 A-2 运输方式的焓消耗.....	176
表 A-3 烧结工序焓消耗.....	177
表 A-4 炼焦工序焓分析.....	177
表 A-5 炼铁工序焓消耗.....	178
表 A-6 电炉钢的焓消耗.....	179
表 A-7 吨转炉钢焓消耗.....	179
表 A-8 直接还原铁工序物料及焓消耗.....	180
表 A-9 各工序的累计焓消耗.....	180
表 A-10 炼钢各工序间焓投入产出表.....	181
表 A-11 物质热焓及化学焓	182
表 A-12 物质的热焓及化学焓（续）	183
表 B-1 河北省 2003 年可再生资源及其生产 ECEC	184
表 B-2 2003 年河北省非可再生资源生产和使用	185
表 B-3 2003 年河北省进口产品和服务 ECEC	185

表 B-4 2003 年河北省出口产品和服务 ECEC 185

表 B-5 2003 年河北省资源价值 186

表 B-6 2003 年河北省 ECEC 流汇总表 186

表 B-7 河北省废弃物及其综合利用 ECEC 186

表 B-8 2003 年河北省 ECEC 指标 187

表 B-9 2003 年河北省循环经济 ECEC 指标 188

表 B-10 河北省 2000—2003 年主要可持续发展 ECEC 指标对比表 188

附图索引

附图 1 独立生产模式物流能流分析示意图 195

附图 2 初步连接模式物流能流示意图 195

附图 3 循环经济（生态工业园）规划物流能流图 196