

中国能源 效率问题研究

THE RESEARCH
ON ENERGY EFFICIENCY OF CHINA

徐国泉 / 著



经济科学出版社
Economic Science Press

江苏省教育厅高校哲学社会科学基金项目（2010SJB79003）
苏州科技学院哲学社会科学优秀学术著作出版基金资助

中国能源 效率问题研究

THE RESEARCH
ON ENERGY EFFICIENCY OF CHINA

徐国泉 / 著



经济科学出版社
Economic Science Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国能源效率问题研究 / 徐国泉著. —北京: 经济科学出版社, 2013. 8

ISBN 978 - 7 - 5141 - 3444 - 5

I. ①中… II. ①徐… III. ①能源效率 - 研究 - 中国 IV. ①F206

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 106787 号

责任编辑: 段 钢

责任校对: 刘 昕

版式设计: 齐 杰

责任印制: 邱 天

中国能源效率问题研究

徐国泉 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编部电话: 010 - 88191217 发行部电话: 010 - 88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http: //jjkxcs. tmall. com](http://jjkxcs.tmall.com)

北京万友印刷厂印装

710 × 1000, 16 开 14 印张 260000 字

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5141 - 3444 - 5 定价: 40.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010 - 88191502)

(版权所有 翻印必究)

前 言

能源问题是中国面临的巨大挑战之一。主要问题在于：一方面能源供应跟不上经济增长的需要，另一方面存在着能源浪费严重和效率低下的状况；能源增长面临着既要满足经济和社会发展的需求又要减轻环境污染的双重压力。能源效率有助于缓解这些问题，还能带来经济效益，提升经济的总体竞争力，因此，能源效率已成为世界各国未来可持续发展的有效途径和重要保证。

本书应用系统思想，分别从经济、环境、生态等多个角度，运用多种定量方法，全面系统地对中国能源效率及其影响因素进行科学准确的评价，为制定中国中长期能源发展战略提供基本依据。本书以能源效率为中心，从以下几个方面展开研究：

第一，关于基于能源效率的能源—经济—环境（3E）系统协调发展理论。本书从能源发展面临着能源短缺和环境污染的双重压力的现实出发，以环境的功能分解入手，阐述了能源—经济—环境（3E）系统的形成、关联和演进，揭示了基于能源效率的能源—经济—环境（3E）系统协调发展思想。在此基础上构建了3E系统的调控模型，理论上探讨了通过技术进步提高能源效率是3E系统调控的重要手段和最佳切入点。

第二，关于能源与经济的响应关系及其影响因素。对中国能源强度的因素分解表明，能源强度变化的结构贡献不高，且结构因素推动制造业能源强度的上升，这表明经济发展仍没走出粗放型的路子，通过结构调整来降低能源强度的潜力还有待挖掘。

第三，关于区域全要素能源效率的评价。本书基于全要素能源效率指数，对中国区域能源效率的实证分析表明，中国区域能源效率基本呈现出由东南到西北方向逐步下降的趋势。同时，发现全要素能源效率与区域经济的发展水平呈现“U”型的关系，这基本反映了区域在发展过程中，由粗放型向集约型发展的过渡。

第四，关于能源的生态环境效益评价。环境效益方面，对人均碳排放

的因素分解分析表明，能源效率对抑制中国碳排放的作用在减弱，能源效率和能源结构的抑制作用难以抵消由经济发展拉动的中国碳排放量增长。生态效益方面，对能源生态压强和生态效益的分析结果显示，中国整体的生态包袱在加大，各区域能源生态也都在偏离可持续方向，特别是东部沿海和东北地区；但中国的总体能源生态效益是在不断的提高，各区域也都在向可持续方向发展。

第五，关于能源、经济与环境的综合评价。在综合发展水平上，中国3E系统整体水平显著提高，但各区域间差异明显，东部沿海和南部沿海的综合发展水平较高，而东北地区较低。沿海地区环境系统发展水平较低，这说明在发展经济的同时却在一定程度上忽视了环境系统的发展。在系统协调性上，中国3E系统整体上向协调状态发展，并趋于稳定。但沿海地区经济与环境、能源与环境之间的协调发展状态并没有根本改善。

第六，关于中国的能源效率革命。本书在中科院《能源情景分析报告》的基础上，对中国的能源效率革命的倍数作了探讨，认为中国在顺利完成政府规划的各项指标（B情景）的基础上，适当强化政策就能实现能源效率的2倍革命。为此提出了中国实现能源效率革命的六大举措。

本书认为，在制定中长期能源发展战略的过程中，对于能源效率的评估要基于经济效益、环境效益、生态效益等多方面的考虑，同时还应考虑能源、经济与环境协调发展以及区域间存在的客观差异。

本书的主要创新点如下：

第一，从能源发展面临着能源短缺和环境污染的双重压力的现实出发，阐述了能源—经济—环境（3E）系统的协调发展思想，并构建了基于能源效率的能源—经济—环境（3E）系统调控模型。

第二，通过对单要素能源效率和全要素能源效率两方面的评价，揭示了能源效率与经济结构、产业结构和经济水平相关变化的规律性特征。

第三，应用生态足迹理论，分析能源生态足迹来评价能源生态效益，展示了中国能源生态效益整体提高和各地区走向可持续发展的不平衡性。

本书是作者在博士论文的基础上修改而成的，衷心感谢两位导师刘则渊教授和姜照华教授的悉心指导。由于作者水平所限，书中可能存在不妥之处，敬请各位领域内的专家学者和读者批评指正！

徐国泉

2013年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 问题提出及研究意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 问题的提出及选题的意义	6
1.2 国内外研究综述	7
1.2.1 能源—经济—环境 (3E) 系统的研究综述	7
1.2.2 能源效率概念和指标的研究综述	12
1.2.3 能源效率评价方法的研究综述	14
1.2.4 能源效率潜力的研究综述	19
1.2.5 能源效率政策机制的研究综述	20
1.2.6 国内外研究的异同及不足	23
1.3 本书研究的相关基础问题	24
1.3.1 能源效率指标	24
1.3.2 本书对相关能源效率指标的界定	30
1.3.3 资源 (能源) 效率的评价方法	31
1.3.4 本书主要采用的研究方法	36
1.4 本书的研究框架与主要创新点	36
1.4.1 研究框架	36
1.4.2 主要创新点	38
第 2 章 基于能源效率的能源—经济—环境 (3E) 协调发展理论	40
2.1 能源—经济—环境 (3E) 议题的提出	40
2.2 能源—经济—环境 (3E) 系统的形成和拓展	41
2.2.1 经济—环境系统	41

2.2.2	能源—经济—环境(3E)系统	43
2.2.3	技术支持的能源—经济—环境(3E)系统	44
2.3	能源—经济—环境(3E)的关联	45
2.3.1	能源—经济—环境(3E)的关联分析	45
2.3.2	中国3E系统关联的实证分析	46
2.4	基于能源效率的3E系统协调优化	55
2.4.1	能源—经济—环境(3E)系统的演进	55
2.4.2	技术进步对3E系统协调发展的作用	57
2.4.3	基于能源效率的3E系统调控	58
2.5	本章小结	61
第3章	能源强度的决定因素分析	62
3.1	中国产业结构与能源消费的变化趋势	62
3.1.1	三次产业结构变化	62
3.1.2	中国能源消费趋势	62
3.1.3	中国能源强度的变化趋势	63
3.2	能源强度的因素分解模型	65
3.3	中国能源强度的因素分解分析	67
3.3.1	中国整体能源强度的因素分解分析	67
3.3.2	各类能源消费强度的因素分解分析	71
3.3.3	结果分析与讨论	81
3.4	中国制造业能源强度的因素分解分析	86
3.4.1	制造业部门产业发展与能源消费趋势分析	87
3.4.2	制造业部门总体能源强度的因素分解	90
3.4.3	制造业部门各类能源消费强度分解分析	95
3.4.4	结果分析与讨论	103
3.5	本章小结	104
第4章	全要素能源相对效率分析	106
4.1	全要素能源相对效率(TFEE)	106
4.2	数据收集、变量测算及整理	113
4.3	中国区域全要素能源相对效率分析	126
4.3.1	中国区域能源消费的调整	126

4.3.2	中国区域全要素能源相对效率	132
4.3.3	全要素能源相对效率与区域经济发展	136
4.4	本章小结	137
第5章	能源的生态环境效益评价	139
5.1	碳排放的因素分解分析	139
5.1.1	分解模型	139
5.1.2	中国碳排放的因素分析	141
5.1.3	主要结论及对策	145
5.2	能源的生态包袱与生态效益分析	146
5.2.1	能源足迹、生态压强与生态效益的概念界定	146
5.2.2	中国区域能源生态压强及生态效益分析	151
5.2.3	主要结论	164
5.3	本章小结	166
第6章	能源、经济与环境(3E)系统的综合评价	167
6.1	能源、经济与环境(3E)系统综合发展水平	167
6.1.1	指标体系设计的基本原则	167
6.1.2	3E系统的指标体系架构	168
6.1.3	中国能源、经济与环境的发展水平测度	170
6.2	能源、经济与环境(3E)系统协调性评价	180
6.2.1	能源、经济与环境(3E)系统协调性评价模型	180
6.2.2	中国能源、经济与环境(3E)系统协调性评价	181
6.3	本章小结	185
第7章	中国能源效率革命的倍数估计及实现措施	186
7.1	中国能源效率状况的国际比较	186
7.2	中国能源效率低下的主要原因分析	188
7.3	中国能源效率革命的倍数估计	189
7.3.1	能源效率革命的国际经验	189
7.3.2	中国能源效率革命目标倍数的初步估计	190
7.3.3	中国能源效率倍数革命的情景分析	191
7.3.4	中国能源效率革命的影响因素分析	196

7.4	中国实现能源效率革命的措施	197
7.5	本章小结	201
第8章	结论与展望	202
8.1	研究结论	202
8.2	研究不足与后续研究展望	206
	参考文献	207
	后 记	218

第 1 章

绪 论

1.1 问题提出及研究意义

1.1.1 研究背景

能源是天然或转变的资源，也是促进经济增长的基本要素之一。能源问题，特别是石油供应，是中国发展面临的巨大挑战之一。近几年，中国经济持续增长使能源短缺和环境污染日渐突现出来。

(1) 中国能源经济的重大转折。

20 世纪 90 年代人均生活消费能源有所下降，能源效率迅速提高，90 年代中国能源经济发生重大转折。1992 年邓小平同志南方谈话后，深化改革、扩大开放，经济空前活跃，能源经济发生了几个重大转折（见图 1-1）：

1992 年起中国能源消费总量超过能源生产总量，依靠石油进口弥补生产不足，1993 年中国成为石油净进口国。

1996 年后中国能源生产和消费都呈下降趋势，但生产下降更大，主要是煤炭生产因中小煤窑关闭而减少，致使石油进口不断增加，同时电力比重提高。

2000 年随着经济的持续快速增长，带动了能源的生产和消费的急剧上升。

(2) 经济快速发展。

世界经济呈现全球化、知识化、生态化趋势，各国经济特别是发展中国家经济稳步增长，并迈向经济可持续发展的道路。

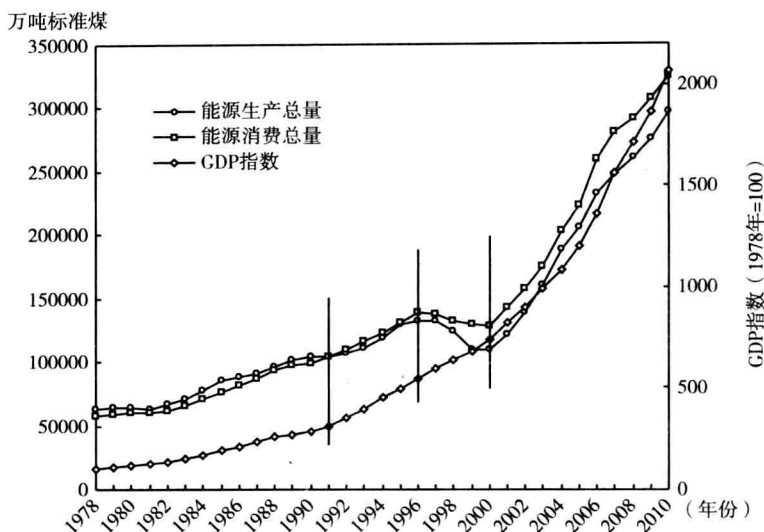


图 1-1 中国能源生产、消费与 GDP 的增长

资料来源：国家统计局. 中国统计年鉴 2011. 中国统计出版社，2012.

新中国成立 60 多年，尤其是改革开放 30 多年来的发展，中国社会经济取得了长足进步，20 世纪末，中国经济已从 1989 年的世界第 8 位上升为 2000 年的第 6 位，与发达国家之间的差距不断缩小。1978 ~ 2000 年，中国的国民经济一直保持持续的高速增长，国内生产总值（GDP）年均增长率达 9.5%，远高于同期世界平均水平。截至 2000 年年底，中国国内生产总值（GDP）已经达到 8.9 万亿元。按 2000 年可比价计算，1978 年中国人均 GDP 仅为 1257 元，2000 年则增加到 7054 元，人均 GDP 比 1978 年翻了两番以上。

进入 21 世纪，中国开始全面建设小康社会，迈向现代化第三步战略目标。中国在全球和平崛起势不可当，其国际地位进一步上升。根据中国国家统计局发布的数据，2010 年中国 GDP 达到 40.33 万亿元（约合 5.96 万亿美元），经济规模已经超过日本，成为全球第二大经济体。

麦迪森（Maddison A）按购买力平价（PPP）预测，2015 年 GDP 将与美国持平，但人均 GDP 相差仍高达 4 倍^[1]。也就是说，按麦迪森（Maddison A）的计量，中国那时将成为世界最大经济体（见表 1-1）。

表 1-1 中国和美国 GDP (10 亿 1990 年国际元) 在世界经济中的地位

单位: 万亿元

	1700	1820	1900	1950	2001	2015
中国	83	229	218	240	4570	11463
美国	0.5	13	312	1456	7966	11426
世界	371	696	1973	5326	37148	57947
中国占世界比重%	22	33	11	5	12	20

资料来源: 引自 Maddison A 著. 世界经济千年史. 北京大学出版社, 2003: 5 页.

这种态势不仅带来世界和中国能源需求不断增长和国际能源市场扩大, 而且导致能源买方市场激烈竞争、石油价格大幅度攀升和要求世界能源效率进一步提高, 必将引发一次新的能源效率革命。

(3) 能源需求迅猛增长。

经济的快速发展必然引起对自然资源, 特别是对能源的巨大需求。美国能源部发表的 2004 年度《国际能源展望》报告指出, 到 2025 年全球能源消费将迅速增长, 特别是发展中国家的能源需求将随着经济快速增长而迅猛增加。报告预测, 到 2025 年, 全球能源消费量将比 2001 年增长 54%。其中工业国家的能源消费将以平均每年 1.2% 的速度增长。而包括中国和印度在内的亚洲发展中国家的能源需求将比目前增加 1 倍, 占全球能源需求增长量的 40% 和发展中国家增长量的 70%。

近几年中国能源消费增长迅猛, 2004 年中国成为超过日本、仅次于美国的世界第二能源消费大国。虽然煤仍将是中国的主要能源, 但石油需求将急剧增长。据中国石油天然气公司研究报告预测, 2015 年和 2020 年中国石油需求将增长到 5.4 亿吨和 6.0 亿吨。中国是世界第五大石油生产国, 但由于石油剩余可采储量最大可能的年生产潜力估计为 1.8 亿~2 亿吨, 2015 年、2020 年石油进口保守估计将分别上升到 3.2 亿吨和 3.6 亿吨 (见图 1-2)。

在未来一段时期内, 中国的经济将会保持以较高的速度增长, 城市化进程也会加快, 中国能源消费的继续增长将不可避免。如果中国重复发达国家在历史上所经历过的发展道路, 2050 年中国达到中等发达国家水平时, 人均能源消费 3.5 吨标准油当量, 届时中国的能源总消费量将达到 52.5 亿吨标准油当量, 相当于目前世界能源消费总量的 60%, 如何满足中国的能源需求, 对中国自己的能源供应以及对世界能源供应

都将是一个巨大挑战。

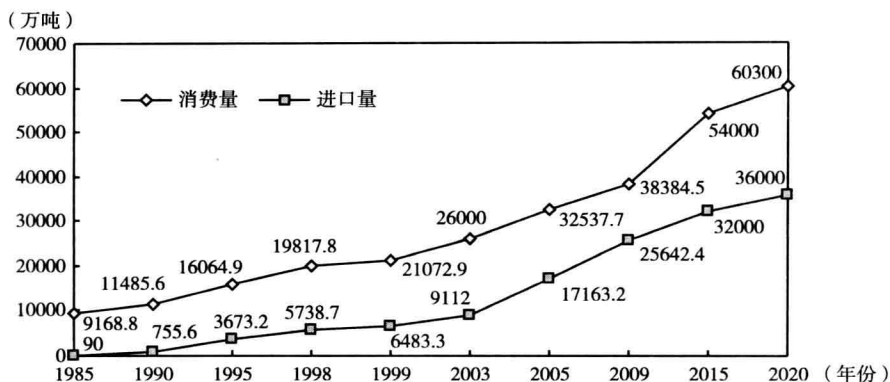


图 1-2 中国石油消费量与进口量的增长及预测

资料来源：《2010 中国能源统计年鉴》；中石油经济技术研究院，《2010 年国内外油气行业发展报告》。

(4) 能源增长面临环境的巨大压力。

中国和平崛起对能源的巨大需求，使能源发展面临既要满足国民经济增长和人民生活水平提高，又要满足环境污染减少的双重压力（见表 1-2）。

表 1-2

中国一次能源消费结构

单位：%

	1980 年	1985 年	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2008 年	2009 年	2010 年
煤炭	72.2	75.8	76.2	74.6	69.2	70.8	70.3	70.4	68
石油	20.7	17.1	16.6	17.5	22.2	19.8	18.3	17.9	19
天然气	3.1	2.2	2.1	1.8	2.2	2.6	3.7	3.9	4.4
水电、核电、风电	4	4.9	5.1	6.1	6.4	6.8	7.7	7.8	8.6

资料来源：国家统计局，中国统计年鉴 2011，中国统计出版社，2012。

中国尽管能源结构开始发生变化，电力和油气有所增加，清洁能源比重不断提高，煤炭有所减少，但 2010 年煤炭比重仍高达 68%，使温室气体排放和大气污染日趋加重。另外，由于家用汽车迅速增长，对化石燃料的需求急剧增加，使中国城市污染中汽车尾气污染开始超过工业废气（见表 1-3）。

表 1-3 温室气体与能源同步增长预测

	1980年	1990年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2025年
煤 (亿吨)	6.90	11.24	12.82	23.33	25.35	30.45	35.30	40.43
石油 (百万桶/天)	1.15	2.30	4.92	6.77	9.4	10.5	11.9	13.6
CO ₂ (亿吨)	3.97	6.11	7.94	14.51	15.97	19.09	22.25	25.50

资料来源：历史数据来自 EIA, International Energy Annual 2012. www.eia.doe.gov/iea/. 预测数据来自 EIA, Annual Energy Outlook 2012. www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/.

(5) 能源效率仍不高。

中国总体上取得了 GDP 翻两番、能源翻一番、能源效率提高 3 倍多的显著成就（见表 1-4）。在一定意义上说，我们已经发生了第一次能源效率革命。

表 1-4 1978~2000 年中国能源效率提高 3.3 倍

年份	GDP (亿元, 1990 年不变价)	能源消费总量 (百万吨标准煤)	单位 GDP 能耗 (吨标准煤/万元)
1978	6584	571	8.67
1990	18548	987	5.32
2000	50029	1303	2.60
2000 年比 1978 年		2.28 倍	30% (1/3.3)

资料来源：引自魏一鸣等. 中国能源报告 (2006). 北京: 科学出版社, 2006.

从表 1-4 可以看出，改革开放以来，以 1978 年不变价计算，中国 2000 年 GDP 为 1978 年的 7.6 倍，能源消费量只为 1978 年的 2.28 倍，单位 GDP 能耗大幅下降 70%，或者说能源效率提高了 3.3 倍。

尽管中国能源效率成倍提高，但同世界先进水平仍有较大差距。从单位 GDP 能耗看，按 1995 年美元不变价格汇率计，2002 年世界平均单位 GDP 能耗为每百万美元 262 吨标准煤，美国为 249 吨标准煤，OECD 国家平均为 188 吨标准煤，日本为 90 吨标准煤，而中国为 837 吨标准煤，为世界平均水平的 3.2 倍、欧盟的 5.7 倍、日本的 9.3 倍（见表 1-5）。

表 1-5 单位产值 (GDP) 能耗的国际比较 单位: 吨标准煤/百万美元

年	按汇率计		按购买力平价计	
	1995 年	2002 年	1995 年	2002 年
中国	1229	837	285	194
美国	285	249	284	248
欧盟	160	148	185	170
日本	94	90	176	169
俄罗斯	1978	1643	176	160
印度	589	619	148	133
OECD	204	188	232	210
非 OECD	634	564		
世界总计	283	262		

注: (1) 美元为 1995 年币值。(2) 欧盟为 15 国。

资料来源: 日本能源经济研究所. 日本能源与经济统计手册. 2005.

1.1.2 问题的提出及选题的意义

以上背景说明, 中国的经济发展正处于转轨时期, 未来中国能源环境问题将十分突出, 严重的问题在于, 一方面能源供应跟不上经济增长的需要, 另一方面又存在能源浪费严重和效率低下的状况; 而能源增长面临着既要满足经济社会发展需求, 又要减轻环境污染的双重压力。这主要因为: 一是资源分布不均。经济发达地区能源短缺供应不足; 二是中国能耗高、能源效率低; 三是以煤为主的能源消费结构带来严重的环境污染, 由燃料结构及利用效率低引起的煤烟型污染和主要由火电、建材、钢铁、化工等行业所造成的污染占整个大气污染的 70% 以上; 四是中国能源关键技术落后。迄今为止, 只注重能源的生产能力, 忽视能源消费方式和环境后果的现象还十分严重, 可持续的能源消费模式尚未成型。

能源短缺和环境污染的问题日益突出, 已成为中国经济社会可持续发展的两大问题。因此, 采取能源开发与节约并重、坚持节能优先、调整能源结构、充分利用国内外能源、保障能源安全的方针, 便是必然的选择。其中, 开展一场持久的能源效率革命, 对于保障国家能源安全和国民经济可持续发展, 无疑具有重大的现实意义和深远的战略意义。而实现能源效

率革命的首要问题是要对能源效率现状及其影响因素有一个准确的评价。

社会进步、经济发展、科技进步和宏观政策都将直接影响能源系统的效率。相反,能源供求也直接影响经济、社会和环境的综合发展。能源与经济、环境之间存在相互推动而又相互制约的关系。本书综合运用经济学、系统工程、计量经济学、能源经济学等多学科的理论与分析方法,尝试着综合运用多种定量方法,系统地、全面地对中国能源效率进行评价,对于中国能源经济理论的发展是一个必要的补充。对中国能源效率的状况以及影响因素的准确评价,为制定中国中长期能源发展战略提供基本依据,对于实现中国能源的可持续发展、资源永续利用,缓解环境压力,实现小康社会及现代化目标,建设节约型社会、和谐社会和生态文明都具有重要的现实意义,同时本书对于各省区市的能源问题具有指导意义。

1.2 国内外研究综述

1.2.1 能源—经济—环境(3E)系统的研究综述

从现有的可得文献来看,关于能源—经济—环境系统大致有三方面的研究:一是关于能源—经济—环境系统协调发展的理论问题研究,二是关于能源—经济—环境系统的模型方法研究,三是关于能源—经济—环境系统评价的研究。

(1) 能源—经济—环境系统协调发展的理论研究。

可持续发展是追求经济子系统、社会子系统、自然子系统的协调发展^[2]。1972年罗马俱乐部发表了梅多斯(D. L. Meadows)等人关于人类困境的报告《增长的极限》中指出:如果一味地以追求经济快速增长的创新模式发展下去,世界将面临一场灾难性的资源和环境大崩溃^[3]。科尔(Cole et al.)等学者对梅多斯等人的“增长极限论”提出质疑,认为适当改变模型结构时的结果表明,崩溃是不会发生的^[4]。埃里希(Ehrlich)和霍尔德里(Holdren)于1974年提出IPAT公式来说明经济增长对环境资源的影响,揭示了降低环境影响可以通过:限制人口增长、限制物质水平、改善技术,降低产品的单位产出环境资源影响强度三种途径来实现^[5]。厄恩斯特·冯·魏茨察克和艾默里·B. 洛文斯提出四倍跃进的思想,即以一半的资源消耗创造双倍的物质财富^[6]。唐奈勒·H. 梅多斯、

丹尼斯·L·梅多斯和约恩·兰德斯在1992年出版,该书再一次提出建立可持续发展社会的紧迫性,并提出全新的思想和观念,即要改变那种消耗越多、生产越多、消费越多,生活质量就越高的传统思想,建立高效使用能源和材料,维持充足、公平而不是过度奢侈和浪费的生活的行为方式^[7]。

对于以上涉及人类命运和前途的讨论中出现过悲观派、谨慎悲观派、乐观派和谨慎乐观派,但其提出的观点和采用的研究模式却是值得认真思考和借鉴的。这同样也引起了中国学者的关注。

1996年,大连理工大学和日本地球环境产业技术研究机构联合主办了以“经济—能源—环境”为主题的“21世纪可持续发展国际学术研讨会”,会上探讨了经济、能源、环境(3E)相互协调的可持续发展战略,其中,刘则渊以经济、资源(能源)、环境协调发展理论为基础,阐述了建设可持续发展的生态城市问题;周玮生、柳泽幸雄等从经济—能源—环境相互协调的可持续发展理念出发,运用基于3E协调的优化全球能源系统模型,对21世纪中国能源供求及CO₂减排对策进行了数值模拟,结论之一就是:对于重视经济—能源—环境三者协调的可持续发展的中国来说,最有效的对策便是节能,这里所说的节能是指通过提高最终需求部门的利用效率,提高能源转换效率等能源利用技术来实现的^[8]。张曙红、武鹏程以区域环境、资源、经济协调发展为目标,通过构建评价指标体系模型、投入产出分析模型、区域环境承载力模型、模糊综合评价、灰色关联分析等,研究了区域环境、资源、经济协调发展的综合集成决策支持系统体系结构^[9]。杜慧滨在前人研究工作的基础之上,尝试性地建立区域3E复杂系统的自组织演化模型体系基于自组织理论的区域能源—环境—经济(3E)复杂系统的分析与应用研究^[10]。清华大学的孟庆国等人认为在实现可持续发展目标的过程中必须要对技术创新的作用进行重新反思,要充分认识到技术创新的两面性,并通过寻求新的思路对传统技术创新体系加以调整和转换,使之能够成为推动经济、社会和自然复合系统协调、持续发展的结合点^[11]。方杰则从能源、经济、环境系统的角度提出了建立我国能源循环经济体系的对策^[12];阎伍玖、王红瑞、王岩研究了中国人口、能源、经济发展的环境影响通径问题^[13];林师模、苏汉邦、林幸桦则探讨了能源技术创新对经济、能源及环境的影响^[14]。

由以上可以看出,对能源、经济和环境系统的研究更多的是对影响系