

科学经管文库

中国能源效率研究

China Energy Efficiency Research



周德群 查冬兰 周 鹏 等 著



科学出版社

科学经管文库

中国能源效率研究

China Energy Efficiency Research

周德群 查冬兰 周 鹏 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统研究能源效率，主要围绕什么是能源效率、为什么研究能源效率、如何测度能源效率、如何提高能源效率、提高能源效率后会产生什么样的影响等理论与实际问题展开研究。全书分为理论篇和实证篇，理论篇对能源效率的概念、测度方法、影响因素、要素替代关系、回弹效应、常用分析方法等基本理论问题进行系统梳理与研究；实证篇则通过中国的实际数据，对能源效率进行定量分析、建模与政策模拟，揭示中国能源效率的种种表现与深层次的因素，为能源效率政策选择提供参考。

本书是南京航空航天大学能源软科学研究中心近年来对能源效率问题进行研究取得的重要研究成果，适合政府决策部门、能源政策制定部门、能源经济与环境管理的研究人员，以及关心中国能源发展的人士阅读，也可作为相关专业研究生的学术参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国能源效率研究/周德群等著. —北京: 科学出版社, 2012
(科学经管文库)

ISBN 978-7-03-033505-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 019484 号

责任编辑: 赵静荣 林 建/责任校对: 刘亚琦

责任印制: 张克忠/封面设计: 蓝正设计

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年2月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2012年2月第一次印刷 印张: 14

字数: 280 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

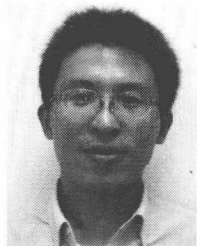
作者简介



周德群，1963年8月生，江苏盐城人，工学博士。现任南京航空航天大学经济与管理学院副院长，校特聘教授，博士生导师。江苏省高校哲学社会科学重点研究基地“能源软科学研究中心”主任。兼任国际能源经济学会中国委员会秘书长，中国优选法统筹法与经济数学研究会理事兼能源经济与管理分会副理事长，江苏省系统科学研究会副会长。长期从事能源软科学、管理科学与系统工程等领域的教学研究工作，主持国家哲学社会科学基金重大招标项目、国家自然科学基金项目、国家软科学基金项目、教育部人文社会科学基金项目等重要课题二十余项，在 *Energy Policy*、*Energy Economics*、《管理科学学报》、《经济学动态》、《中国工业经济》等国内外重要学术刊物发表论文七十余篇，出版学术著作四部，研究成果被同行引用四百余次。提交的多份决策咨询报告得到中央及有关部门领导的重视。



查冬兰，1983年1月生，江苏江阴人，管理学博士。现任南京航空航天大学经济与管理学院讲师，博士后，研究方向为能源环境系统分析与建模。目前主持教育部人文社科基金项目、教育部博士点基金项目和博士后基金项目，近年来以第一作者在 *Energy Policy*、*Applied Energy*、《数量经济技术经济研究》、《管理评论》等国内外刊物上发表学术论文二十余篇，担任 *Energy Economics*、*Energy Policy* 等国际期刊审稿人。



周鹏，1978年12月生，山东诸城人，2008年获新加坡国立大学博士学位，研究方向为能源—经济—环境系统、效率分析。已主持完成一项国家自然科学基金管理科学部应急项目，目前主持两项国家自然科学基金项目。2010年获得 ProSPER Net-Scopus 可持续发展青年科学家奖，入选2010年教育部新世纪优秀人才支持计划、江苏省“333高层次人才培养工程”培养对象、江苏高校“青蓝工程”中青年学术带头人培养对象。在 SSCI/SCI 上发表论文三十余篇，研究成果被国际期刊引用三百余次，同时担任国际期刊 *Energy Economics*、*International Journal of Performability Engineering* 的编委。

序

能源效率是保障国家能源安全、增强经济竞争力和减少温室气体排放的最为经济有效的方式。大量的研究表明，主要能源消费部门，如交通、工业、居民和服务等，在提高能源效率方面都具有巨大的潜力，然而，现实中大多数国家能源效率的提升效果并不尽如人意。目前，几乎所有的国家都对能源效率寄予厚望，认同能源效率在实现长期的能源和气候目标方面扮演着关键角色。显然，在计划和实施能源效率战略以及提升其有效性方面，各国任重而道远。

经验表明，能源效率的管理和实施极其复杂。任何一个能源消费部门、任何一个消费层次皆是如此。诸多计划和实施能源效率项目的直接参与者指出，跨领域的专业知识对管理能源效率至关重要，这些专业知识涵盖能源科学、能源工程、技术管理、经济学和行为科学。尤为重要的是，需要一种系统的方法将各类要素或子系统整合在一起，考虑必然的权衡取舍，以实现理想的能效实施效果。

基于以上考虑，任何有助于深入理解能源效率的研究都有其价值所在。该书作者运用了能源效率建模和分析文献中的多种方法技术，针对中国能源效率问题开展了一些有意义的研究。在中国经历了 30 多年高速增长而不得不面对迅速增长的能源消费及随之而来的其他挑战的今天，该书的出版可以说是正当其时，因为其聚焦于中国的能源效率及其政策选择。书中涵盖了能源效率的基础、概念和测度，以及能源与其他生产要素的关系等内容，从研究内容上来讲较为系统全面。对于从事中国能源效率研究或对该领域感兴趣的学生、研究人员、分析师和政策制定者而言，该书具有重要的参考价值。

洪明华 教授

新加坡国立大学工业与系统工程系

Foreword

Energy efficiency has been recognized as the most cost-effective way of enhancing national energy security, improving economic competitiveness, and reducing greenhouse gas emissions. In the literature, many studies can be found reporting great potential for energy efficiency improvements in all major energy consuming sectors, such as transportation, industry, resident, and service. In reality, however, achievements in most countries have so far fallen short of expectations. At present, virtually all countries place high hope on energy efficiency and consider it a key factor in achieving long-term energy and climate goals. It is clear that much needs to be done in the planning and implementation of energy efficiency strategies and initiatives to improve their effectiveness.

Experiences show that managing and implementing energy efficiency are complex and non-trivial. This is generally true for energy consumption in all sectors and at all levels, from individual households and enterprises to major energy consuming sectors in the economy such as transportation and industry. Those directly involved in the planning and implementation of energy efficiency programs are quick to point out that knowledge and expertise across a wide spectrum of disciplines, including energy science and engineering, technology management, economics and behavioral sciences, is essential to manage energy efficiency. On top of that, a system approach that integrates a wide range of elements or sub-systems and balances various inevitable trade-offs is needed in order to help lead to the desired outcomes.

Given the above, any scholarly work that helps to advance our knowledge and understanding of energy efficiency is to be welcome. As one such work, this book is an interesting treatment of energy efficiency with a focus on China using various approaches and analytical techniques that have been reported in the energy efficiency modeling and analysis literature. It is also a timely piece of work as it deals with energy efficiency and policy options in China where rapid economic growth in the last three decades has led to substantial increases in energy consumption and to many challenges resulting from such increases. Supplemented by introductory chapters on the fundamentals, concepts and measurement of energy

efficiency as well as how energy is linked to other factors of production, the book is comprehensive both in terms of scope and coverage. It will be a useful reference for students, researchers, analysts and policymakers working on or interested in energy efficiency in China.

Professor B. W. Ang
Department of Industrial and Systems Engineering
National University of Singapore

前 言

能源是一种特殊的资源，人们可以从中获得能量以满足生产与生活的需要，促进经济、社会的进步与发展。从经济领域的视角来看，能源作为现代经济增长中重要的投入要素之一，对世界经济的增长起着决定性的作用。中国是能源生产与消费大国，改革开放以来，随着经济的快速发展，我国在能源领域取得了举世瞩目的成就，能源生产与消费总量居于世界前列，但由于我国人口众多，人均能源还远低于发达国家水平，甚至低于世界平均水平。随着我国工业化、城镇化进程的加快，能源约束问题日益凸显，能源导致的环境污染日趋加剧。能源问题不再是一个简单的生产和消费问题，而已成为关系到我国的经济安全与平稳快速发展，关系到我国全面建设小康社会的进程，关系到经济、社会、环境以及产业间、地区间的协调发展，关系到国防、政治、外交的重大社会问题。

保障供应、保护环境、促进增长是能源问题面临的主要目标，而要想实现上述目标，改善能源效率是根本。能源效率政策作为一项可靠、经济和快捷的应对能源供给紧缺、能源价格上升和环境污染的有效途径，被誉为除传统三大能源之外的“第四种能源”，因而受到各国政府的青睐。美国能源信息署（Energy Information Administration, EIA）在 2009 年的《世界能源展望》中提出，终端能源效率的提高将是 2030 年 CO₂ 减排的最大贡献者。根据 Energy Information Administration, EIA (2009) 的预测，2030 年前能源效率的改善仍将是世界节能减排的主要选择，到时将会减少 43% 的能源使用以及 52% 的碳排放。我国近年来高度重视通过实施能源效率政策来促进节能减排，“十一五”规划期间，我国实施了节能优先的方针，通过提高能源利用效率来促进经济结构向降低能源消耗、提升增长质量和效益的方向转变。为应对全球气候变化，我国已明确提出，到 2020 年，单位国内生产总值 CO₂ 排放量比 2005 年下降 40%~45%。依靠节能来提高能效将是现阶段控制温室气体排放的主要举措，据估计，其贡献率达到 90% 以上。因此，改善能源效率仍将是我国中长期内实现节能减排目标的主要抓手。

作为社会经济系统的综合性输出指标，能源效率受到许多因素的影响，并且这些因素往往存在动态不确定性和交互作用。例如，经济结构的调整与变化会受到全球宏观形势与本国发展阶段的影响，能源的生产结构会受到本国资源与外部资源的综合制约，能源的消费结构会受到生产结构以及社会发展水平的影响，科技进步无疑是影响能源效率的最主要因素之一，但其存在不确定性。价格与市场

因素、节能政策、国际贸易政策都会对能源效率的改善产生不同程度的影响，但这种影响往往难以估计，如能源效率提高引致的回弹效应问题。

本书应用管理学、经济学的有关理论与方法，从系统的角度研究中国能源效率问题，围绕什么是能源效率、为什么要研究能源效率、如何测度能源效率、如何提高能源效率、能源效率提高后会产生什么样的影响这些问题展开深入研究。通过理论研究和实证分析，系统架构能源效率分析的基础理论框架，全面描述中国能源效率的种种表现，深刻揭示中国能源效率的本质特征，实现理论的深化和政策的突破。

全书分为理论篇和实证篇，共 14 章。

在理论篇中，我们对有关文献进行回顾与梳理，界定了能源的概念、分类和功能，给出了测度能源效率的不同方法，系统分析了影响能源效率的因素，研究能源与其他生产要素的替代关系，讨论了能源效率回弹效应的问题，全面总结了能源效率常用的分析方法。

在实证篇中，我们通过大量数据资料，借助上述研究方法，研究我国能源效率的总体特征，分别从国际间、省区间对能源效率进行比较，并从行业角度对能源效率的差异及形成原因进行考察，对宏观能源效率回弹效应进行首次估算。进一步地，对我国的全要素能源效率进行测度，并从国际贸易角度分析技术溢出对能源效率的影响。最后，本书针对改善能源效率提出一些政策建议。

本书是南京航空航天大学能源软科学研究中心近年来针对能源利用问题所开展研究工作的专题性总结。能源软科学研究中心成立于 2008 年，在同仁们的共同努力下，中心近年来得到快速发展，先后被评为南京航空航天大学优秀科研创新群体和江苏省高校哲学社会科学重点研究基地。本书是能源软科学研究中心的系列研究报告之一，在研究过程中，得到国家哲学社会科学基金重大项目、国家自然科学基金项目、教育部人文社会科学基金项目、教育部博士点基金项目、中国博士后基金项目、江苏省“333 工程”人才计划项目、南京航空航天大学学术著作出版基金的支持。本书是能源软科学研究团队集体智慧的结晶，其相关内容在研究中心内部得到充分讨论。全书由周德群教授负责总体设计、策划、组织与统稿，查冬兰、周鹏、王群伟、高大伟参与并完成了本书中相关章节的撰写。在出版过程中，科学出版社的林建先生始终对本书予以关注并进行详细耐心指导，赵静荣编辑为本书的出版付出了辛勤劳动，在此表示诚挚谢意。

本书在出版过程中还得到国内外同行专家的支持与帮助，著名能源经济学家、新加坡国立大学 Ang 教授不仅帮助一起指导中心的博士研究生，还专门为本书作序，在此，我们向所有关心和支持中心成长的领导与专家表示衷心感谢。受限于我们的知识水平和能力，书中难免存在不足和待商榷之处，恳请读者批评指正。

目 录

序
前言

理 论 篇

第 1 章 能源效率的概念、分类和功能	3
1.1 能源的概念	3
1.2 能源效率的概念	4
1.3 能源效率的分类	7
1.4 能源效率功能	8
1.5 能源强度	9
第 2 章 能源效率测度	11
2.1 效率的测度.....	11
2.2 生产率的测度.....	12
2.3 单要素能源效率指标.....	15
2.4 全要素能源效率指标.....	16
第 3 章 能源效率的影响因素	18
3.1 经济发展与结构变化.....	18
3.2 能源生产与消费结构.....	19
3.3 技术进步与科技创新.....	20
3.4 产品价格与政府管制.....	21
3.5 外商投资与国际贸易.....	22
第 4 章 能源与其他生产要素的替代关系	24
4.1 能源与其他要素替代关系的理论解释.....	24
4.2 能源与其他要素替代关系的计算方法.....	27
4.3 能源与其他要素替代关系的经验研究.....	27
4.4 能源与其他要素替代关系差异性的原因.....	30
第 5 章 能源效率回弹效应理论	33
5.1 能源效率回弹效应定义与分类.....	33
5.2 能源效率回弹效应理论假说.....	34

5.3	能源效率回弹效应表现形式	36
5.4	能源效率回弹效应的测算	37
5.5	能源效率回弹效应解决措施	41
第6章	能源效率分析方法	42
6.1	指数分解方法	42
6.2	参数方法	45
6.3	非参数方法——数据包络方法	48
6.4	可计算一般均衡模型	50

实 证 篇

第7章	我国能源效率的总体特征	55
7.1	我国能源效率的总体特征	55
7.2	我国不同地区的能源效率	60
7.3	我国不同部门的能源效率	64
7.4	本章小结	72
第8章	能源效率的国际比较	73
8.1	能源消费国际比较	73
8.2	宏观能源强度国际比较	76
8.3	工业能源强度国际比较	79
8.4	运输能源强度国际比较	79
8.5	家庭能源强度国际比较	80
8.6	主要高耗能产品国际比较	80
8.7	本章小结	81
第9章	中国能源效率地区差异研究	83
9.1	中国能源效率地区差异性表现	83
9.2	中国地区节能潜力分析	89
9.3	本章小结	94
第10章	中国能源强度指数分解	95
10.1	中国能源强度变化研究现状	95
10.2	中国能源强度变化模型构建	96
10.3	模型求解和分析	97
10.4	本章小结	102
第11章	中国能源效率回弹效应研究	103
11.1	中国能源效率 CGE 模型构建	103

11.2	基础数据和参数估计	114
11.3	CGE 模型程序的表示和求解	122
11.4	本章小结	126
第 12 章	中国全要素能源效率研究	127
12.1	基于 DEA 的全要素能源效率模型	127
12.2	我国的全要素能源效率	128
12.3	广义技术进步的分解	134
12.4	广义技术进步对我国全要素能源效率的影响	138
12.5	本章小结	140
第 13 章	国际贸易对能源效率的影响	142
13.1	国际贸易结构对能源效率的影响	142
13.2	国际贸易技术溢出对中国省区能源效率的影响	147
13.3	国际贸易技术溢出对中国工业能源效率的影响	160
13.4	本章小结	177
第 14 章	能源效率政策选择	179
14.1	国际能源效率政策现状和实施障碍	179
14.2	中国能源效率政策现状和实施障碍	182
14.3	中国能源效率政策选择	185
14.4	本章小结	189
	参考文献	190
	附录 1 缩略语中英文对照	201
	附录 2 中国分解 SAM 表 (2002 年)	202
	附录 3 CGE GAMS 部分程序	205

理 论 篇

第 1 章 能源效率的概念、分类和功能

化石能源的不可再生性以及粗放型的能源利用方式，给能源的可持续发展、能源的安全，以及环境问题带来了严峻的挑战。近年来，能源效率一词频频出现于学术著作、政府报告及各种媒体中，能源效率问题日益受到公众关注。而关于能源效率内涵的界定，说法各异，尚存在模糊之处。这种模糊性体现在能源效率数据的计算上，由于缺乏统一的口径，能源效率的计算结果彼此之间往往存在较大偏差，从而给理论研究和实际工作带来不便。本章将从界定能源和能源效率的内涵出发，通过对能源效率进行分类，进而阐明为什么要制定能源效率指标，以及能源效率与能源强度有何区别等问题。

1.1 能源的概念

能源 (energy) 一词来源于希腊语 “energeia”，energeia 是由亚里士多德首次提出的科学定义，用于描述任何事物的运动或活动。《大英百科全书》也认为，“从物理上讲，能源就是做功的能力”。因此，任何可以促使物质运动、改变速度、改变方向的事物都蕴涵能源 (Joseph et al., 2011)。它可以存在于潜在的、动力的、热力的、电力的、化学的、核能的等多种形式中，在从一种形态转换到另一种形态的过程中产生热量和功^①。《能源百科全书》给出了“广义能源”的定义，即“驱动一个系统转化的能力”，包括所有形式的物理、化学和生物转化 (Cutler et al., 2004)。美国能源信息署 (Energy Information Administration, EIA) 也认同“能源就是用来做功的能力”^②。《加拿大百科全书》中指出，尽管人们经常将“能源 (energy)”和“功率 (power)”互用，但事实上它们的含义不尽相同。“能源”的定义是“做功的能力”，能源的测量单位是焦耳 (joules) 或者瓦小时 (watt hours)。“功率”是指单位时间内所做的功，其测量单位是瓦特或者焦耳/秒。能源可以划分为一次能源和二次能源：一次能源是指直接从太阳辐射、风、煤、石油、铀等自然资源中获取的能量；二次能源则是由一次能源

① 资料来源：Encyclopedia Britannica. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/187171/energy>.

② 资料来源：EIA. 2011. Energy Basics. http://www.eia.doe.gov/kids/energy.cfm?page=about_home-basics.

转换而来的能量^①。新墨西哥州太阳能协会 (New Mexico Solar Energy Association, NMSEA) 认为“能源的科学定义就是一个物体或系统对另一个物体或系统所做的功”^②。中国的《辞海》对“能源”作了两种定义：一是“能量的资源，指可以取得能量以转换为人们所需的热、光、动力、电力等的自然资源，如燃料、水力、风力等”；二是“借指人所能发挥的精力”，我们通常所说的能源主要是指能量的资源^③。徐寿波院士提出了能源系统的三层概念：一是能源一元结构系统，简称能源系统；二是能源、经济二元结构系统；三是能源、经济、环境、资源、人口多维结构系统。其中，能源效率直接体现了二元结构系统（徐寿波，1994）。

总之，能源是一种特殊的资源，人们可以从中获得能量，用于生产与生活，现代社会更是须臾离不开能源，能源已经与社会经济的发展构成一个有机系统。随着我国工业化、城市化进程的推进，能源约束以及引致的环境外部性问题日益凸显。能源问题已不再是一个简单的生产和消费问题，而是关系到社会、经济、环境、政治、国防、外交等的全局性重大问题。

1.2 能源效率的概念

Encyclopedia Britannica (1974年版) 将“能源效率”定义为“经济学中产出与生产所需能源投入的比例”。世界能源委员会 (World Energy Council, WEC) 在 1995 年发表的《应用高技术提供能效》一文中，把“能源效率”定义为“减少提供同等能源服务的能源投入”。1981 年，美国国会经济委员会 (The Joint Economic Committee of the Congress of the United States) 将能源效率等同于能源强度 (能源投入与 GDP 的比例)。EIA (1995) 将能源效率特征化为增加值的概念 (value-based philosophical concept)。亚太能源研究中心 (Asia-Pacific Energy Research Center, APERC) 对“能源效率”的定义是：能源效率指标是测度生产产出中能源使用的情况 (how well)。相比较而言，这些不同定义的差异性较小。

Patterson (1996) 对能源效率的概念、指标和应用作了一个全面的回顾，指出能源效率本身是一个专业术语，没有明确的定量界定，需要通过指标来反映，可按能源投入和产出的不同界定来定义能源效率：①热力学指标。热力学能

① 资料来源：The Canadian Encyclopedia. <http://www.theCanadianEncyclopedia.com/index.cfm?PgNm=TCE&Params=A1ARTA0002609>。

② 资料来源：New Mexico Solar Energy Association. 2011. What is energy? http://www.nmsea.org/Curriculum/Primer/what_is_energy.htm。

③ 资料来源：《辞海》。 <http://www.521yy.com/cihaizaixianchaci/cihai1.asp?kw=%C4%DC%D4%B4>。

源效率反映的是过程中的一种功能状态 (function state), 在给定特定的物理条件 (温度、压力、浓度、磁化等) 下, 求出最小的能源需求量。按照不同的热量测度方法, 热力学能源效率可分为第一法则能源效率和第二法则能源效率。前者用于宏观层面的能源效率研究, 但该方法因为假定不同能源要素同质而受到质疑; 后者又分为能源质量调整下产出和能源最少投入下的产出。能源质量调整下产出是利用 Gibbs 自由能量的变化量来测量投入能源的相对质量, 能源最少投入下的产出可以用来测量现实世界中能源转化过程对理想能源效率的逼近程度, 是最有效的过程。理想能源效率指标可以应用于微观生产过程的效率测度, 包括化学、运输、热传导, 以及电器设备等, 但由于其对生产的假设是完美可逆的, 没有考虑到实际生产中所存在的各种时间和人力约束, 同时无法进行宏观加总, 实际应用有很大的局限性。②物理-热量指标。该指标计算的能源投入以热量单位计算, 产出是以物理单位测量, 如产品的重量或者运输的里程数。同传统的热量指标相比, 该指标更能直接反映出消费者所需要的终端服务, 可用于相同部门的纵向比较。例如, 美国国会经济委员会建议使用能源投入-立方米来测量商业和居民建筑能源效率、采用能源投入-里程数来计算交通部门的能源效率。物理-热量指标的缺陷在于, 由于每个产业部门生产的产品不同, 可能导致同一种能源投入会有两种或者多种产出。例如, 运输绵羊包括羊毛运输和羊肉运输, 不同产出之间无法加总, 此时就不能计算总的能源效率。③经济-热量指标。能源的经济-热量指标也是一个混合指标, 其中, 产出是按市场价格计算, 能源投入是以传统的热量单位计算。该指标可用于测量不同层面的经济活动能源效率, 包括微观企业、中观行业以及宏观国家层面。指标主要有两种形式, 即“GDP-能源”或“能源-GDP”, 前者称为能源效率, 后者称为能源强度, 两者分别在国家和行业层面上通常被采用。④纯经济指标。该指标通过投入的能源和产出两者的市场价值来衡量, 表示为能源投入价值/总产出。用能源价格而不是热量单位来测量能源投入, 可以解决能源非同质问题, 使不同质量的能源投入可以进行加总。但由于受能源价格变动以及能源价格地区间表现差异的影响, 对指标作比较就较为困难。另外, 纯经济指标也无法衡量能源导致的环境问题。魏一鸣等 (2010a) 将能源效率的内涵界定为所消耗的能源量对于维持或促进整个经济、社会和环境系统可持续发展的贡献量。

提高能源效率的目的在于提供产品和服务时尽可能地减少能源消费, WEC 于 20 世纪 70 年代提出“节能”的概念, 将其定义为“采取技术上可行、经济上合理、环境和社会可接受的一切措施, 来提高能源资源的利用效率”。能源效率常与能源节约混淆, 但从经济和环境角度来看, 能源节约的范围相对更广, 它指从能源生产到其最终使用的全过程 (包括开采、分配、输送、加工转换和终端消费等环节) 减少的损失和浪费。终端能源节约是通过减少对能源产品或服务的消