

21 世纪经济管理精品教材·经济学系列

Advanced Energy Economics

# 高级能源经济学

魏一鸣 焦建玲 编著



清华大学出版社

21世纪经济管理精品教材·经济学系列

Advanced Energy Economics

# 高级能源经济学

魏一鸣 焦建玲 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是在《能源经济学》的基础上,以新形势下产生的能源市场联动性风险、能源与环境、能源安全与安全战略、能源贫困等新的能源经济学问题为研究对象,系统介绍能源市场风险及溢出效应、合同能源管理、能源战略储备、气候变化与二氧化碳减排、能源投融资、能源技术政策、能源安全、能源贫困以及能源消费与公众健康等重要问题。在兼顾教材的系统性要求的同时,本书更加注重把握现代能源经济与管理的发展趋势,力争将最新的发展与研究成果系统化,并注意与中国实际相结合,使之更适应当前高等院校培养高层次的经济与管理类人才的要求,特别是能源经济与管理领域高层次、研究型人才培养的要求。

本书既可以作为能源与经济管理类专业的研究生教材,也可作为高等院校师生、科研人员、企业管理人员及政府部门公务人员的参考资料。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

高级能源经济学/魏一鸣,焦建玲编著.--北京:清华大学出版社,2013

(21世纪经济管理精品教材·经济学系列)

ISBN 978-7-302-32983-1

I. ①高… II. ①魏… ②焦… III. ①能源经济学—高等学校—教材 IV. ①F407.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第148245号

责任编辑:高晓蔚

封面设计:汉风唐韵

责任校对:宋玉莲

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62770175-4903

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:16.5

字 数:378千字

版 次:2013年9月第1版

印 次:2013年9月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:35.00元

产品编号:053343-01



# 前言

能源及其密切相关的气候变化问题已成为当今全球政策界、学术界、工商界和社会公众共同关注的焦点。无论是能源问题还是气候问题,归根结底都是发展问题。在当前和未来相当长的时期内,经济发展仍将是中国的首要任务,能源问题在很大程度上是经济问题。

近年来,能源经济与管理方面的人才需求急剧上升,但这方面的人才培养相对滞后。长期以来,我国从事能源经济学研究或教学工作的人员大多是单一学科背景,要么是侧重经济学,要么是侧重能源工程,主要集中在地质、煤炭、石油、电力等高校,因此,在“石油经济学”、“煤炭经济学”、“电力经济学”等方面有许多很好的研究成果,但大多属于工程经济分析或者财务分析,与经济学有较大区别。事实上,能源经济学是一个多学科交叉性的综合性学科。

解决能源经济复杂系统问题不仅需要自然科学、工程技术科学,以及大量的实践经验,还需要现代经济学思想、理论和方法的指导。能源经济学是现代经济学在能源经济系统中的应用。能源经济学属于应用经济学的范畴,同时由于能源问题的特殊性,也推动了经济学理论和方法的发展,例如产业组织理论、非线性定价等。另外,能源经济学是一类典型的交叉科学,不仅需要依靠以能源工程为具体背景,也需要依靠经济学理论和方法。

按照上述理念,2011年我与焦建玲、廖华等长期从事能源经济与管理研究的学者,共同撰写并出版了《能源经济学》教材,该书自出版以来受到了很多好评。在编写《能源经济学》教材时,我们把受众面主要界定为本科生,因此,我们非常重视教材的基础性,将能源供需、能源市场、能源价格、能源效率等基本问题作为主要内容。随着能源及能源引起的环境等问题日益突出,能源经济学的研究对象已远远超出了《能源经济学》教材的范围。因此,一方面,我们对《能源经济学》进行修订与更新;另一方面着手编写这本《高级能源经济学》。

《高级能源经济学》仍然以能源经济与管理问题为主线,在《能源经济学》基础上,首先,着眼于能源的金融化发展趋势,重点阐述了能源市场风险及市场之间的风险溢出效应;其次,本书突出能源经济学研究对象的宏观性,特别

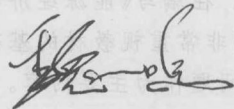


是能源安全战略在国家层面的重要性,系统阐述了现代主要能源安全战略:合同能源管理、能源战略储备、能源投融资、能源技术政策有关概念和理论,并结合实际进行了分析;再次,能源安全不仅包括供给安全、价格安全,还包括使用安全,化石能源利用产生的大量温室气体是气候变化的主要原因,气候变化与二氧化碳减排是本教材另一重要研究问题;最后,能源问题不是单纯的经济问题,而是社会发展问题,本书最后两章从社会发展角度介绍了能源贫困、能源消费与公众健康问题。基于《高级能源经济学》作为教材的特点,本书在探讨能源经济学典型问题的同时,力求引入国际国内最新的研究方法和研究成果,并结合中国实际进行案例分析。

与《能源经济学》一样,《高级能源经济学》的编写也是在我们团队之前出版的学术专著《中国能源报告》和论文的基础上完成。《高级能源经济学》包含10章,由魏一鸣、焦建玲负责组织和统稿,魏一鸣、焦建玲负责主笔,廖华、何凌云、李慷、马晓微、吕斌、丛荣刚、凤振华、赵鲁涛等负责了部分章节的编写。本教材适用于具有高等数学基础的研究生。在本书的写作过程中,参考了大量资料,作者已尽可能地在参考文献中详细列出,在此,特别感谢引文中的所有作者!也有可能由于疏忽,引用了一些资料而没有注明出处。若有此类情况发生,在此深表歉意,并将在修订版本中补充。

教材研究和编写过程中,得到了国家自然科学基金(71020107026,71271074)等项目的支持。先后得到了于景元、彭苏萍、李京文、刘燕华、何建坤、徐伟宣、涂序彦、顾基发、宋建国、汪寿阳、李善同、陈晓田、盛昭瀚、李一军、高自友、张维、黄海军、周寄中、杨善林、杨列勋、刘作仪、李若筠、葛正翔、戴彦德、刘克雨、郭日生、黄晶、孙洪、彭斯震、傅小锋、李景明、李之杰、张建民等专家和领导的鼓励、指导、支持和无私的帮助;国外同行 Tol R S. J., Hofman B., Martinot E., Drennen T., Jacoby H., Parsons J., MacGill I., Edenhofer O., Burnard K., Nielsen C., Nguyen F., Okada N., Ang B., Yan J., Tatano H., Tatsuto Yukihata, Murty T., Yang Z., Erdmann G. 等曾应邀访问能源与环境政策研究中心并做学术交流,他们曾以不同形式给予我们支持和帮助。中国科学院副院长丁仲礼院士也曾为我们的研究工作给予了指导和支持。值此,向他们表示衷心感谢和崇高的敬意!

限于我们的知识修养和学术水平,教材中难免存在缺陷和不足,甚至是错误,恳请各位同人和读者批评指正。



2013年3月20日于北京

# 目 录

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 第 1 章 能源与经济 .....                      | 1  |
| 1.1 能源与经济关系概述 .....                    | 1  |
| 1.1.1 经济发展带动能源消费 .....                 | 1  |
| 1.1.2 经济发展为能源开发利用提供了先决条件 .....         | 3  |
| 1.2 能源与经济增长 .....                      | 4  |
| 1.2.1 经济增长的源泉 .....                    | 4  |
| 1.2.2 能源消费与经济增长因果关系 .....              | 6  |
| 1.3 能源经济学的新发展 .....                    | 8  |
| 本章小结 .....                             | 10 |
| 第 2 章 能源市场风险及溢出效应 .....                | 11 |
| 2.1 能源市场风险概述 .....                     | 11 |
| 2.1.1 能源市场风险的概念 .....                  | 11 |
| 2.1.2 能源市场风险产生的原因 .....                | 11 |
| 2.1.3 能源市场风险的特征 .....                  | 12 |
| 2.2 风险溢出效应 .....                       | 13 |
| 2.2.1 风险溢出效应概述 .....                   | 13 |
| 2.2.2 风险溢出效应检验 .....                   | 14 |
| 2.3 能源市场风险溢出效应检验 .....                 | 19 |
| 2.3.1 WTI 与 Brent 原油现货市场风险溢出效应检验 ..... | 19 |
| 2.3.2 WTI 原油期货与现货市场风险溢出效应检验 .....      | 21 |
| 2.3.3 美元汇率与石油市场风险溢出效应检验 .....          | 22 |
| 2.4 能源市场风险管理 .....                     | 24 |
| 2.4.1 能源金融衍生品市场 .....                  | 24 |
| 2.4.2 正确使用能源金融衍生品 .....                | 25 |
| 2.4.3 能源市场风险管理系统 .....                 | 26 |
| 本章小结 .....                             | 26 |
| 拓展阅读：能源市场与粮食市场的关联性 .....               | 27 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| <b>第3章 合同能源管理</b>              | 30 |
| 3.1 合同能源管理概述                   | 30 |
| 3.1.1 合同能源管理的基本概念              | 30 |
| 3.1.2 合同能源管理的起源及国外进展           | 31 |
| 3.1.3 合同能源管理在我国的发展历程           | 35 |
| 3.2 合同能源管理商务模式与项目基本流程          | 36 |
| 3.2.1 合同能源管理的主要商务模式            | 36 |
| 3.2.2 合同能源管理项目的基本流程            | 38 |
| 3.3 合同能源管理项目的关键环节              | 40 |
| 3.3.1 节能诊断                     | 40 |
| 3.3.2 能耗基准的确定                  | 41 |
| 3.3.3 节能量计算、测量和验证              | 42 |
| 3.3.4 项目风险控制                   | 46 |
| 3.4 合同能源管理项目合同                 | 48 |
| 3.4.1 节能服务合同                   | 48 |
| 3.4.2 节能服务合同与相关合同的关系           | 48 |
| 3.4.3 节能服务主合同范本                | 49 |
| 3.5 合同能源管理项目案例                 | 49 |
| 3.5.1 节能效益分享型                  | 49 |
| 3.5.2 节能量保证型                   | 50 |
| 3.5.3 能源费用托管型                  | 51 |
| 本章小结                           | 51 |
| 附录：合同能源管理项目合同(节能效益分享型)         | 52 |
| <b>第4章 能源战略储备</b>              | 61 |
| 4.1 能源战略储备的概念与作用               | 61 |
| 4.1.1 能源战略储备的概念                | 61 |
| 4.1.2 能源战略储备的作用                | 62 |
| 4.2 能源战略储备规模                   | 62 |
| 4.2.1 能源储备的主体                  | 62 |
| 4.2.2 能源储备的现状                  | 63 |
| 4.2.3 最优战略储备规模                 | 64 |
| 4.2.4 案例研究：中国2020年最优石油储备规模     | 66 |
| 4.3 能源战略储备的补仓策略                | 68 |
| 4.3.1 能源战略储备补仓策略模型             | 68 |
| 4.3.2 案例研究：中国2020年最优战略石油储备补仓策略 | 69 |
| 4.4 突发事件下战略石油储备的释放策略           | 71 |



|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| 4.4.1      | 突发事件下战略石油储备策略的动态规划模型   | 72         |
| 4.4.2      | 突发事件对国际油价的冲击           | 73         |
| 4.4.3      | 案例研究:突发事件下中国战略石油储备释放策略 | 76         |
| 4.5        | 战略石油储备的安全保障能力          | 78         |
| 4.5.1      | 石油供应链网络                | 79         |
| 4.5.2      | 战略石油储备安全保障能力的规划模型      | 80         |
|            | 本章小结                   | 82         |
|            | 拓展阅读:中国石油储备大事记         | 82         |
| <b>第5章</b> | <b>气候变化与二氧化碳减排</b>     | <b>84</b>  |
| 5.1        | 能源利用的环境成本              | 84         |
| 5.2        | 气候变化                   | 86         |
| 5.2.1      | 气候政策                   | 87         |
| 5.2.2      | 全球气候谈判                 | 90         |
| 5.3        | 二氧化碳排放特征               | 92         |
| 5.3.1      | 二氧化碳排放总体状况             | 92         |
| 5.3.2      | 一次能源消费的碳排放             | 95         |
| 5.3.3      | 碳密集部门的碳排放              | 99         |
| 5.4        | 二氧化碳排放影响因素             | 101        |
| 5.4.1      | 经济发展                   | 101        |
| 5.4.2      | 居民消费行为                 | 102        |
| 5.4.3      | 出口贸易                   | 103        |
| 5.4.4      | 主要减排技术                 | 103        |
| 5.4.5      | 主要减排政策                 | 114        |
| 5.5        | 碳排放贸易与碳市场              | 115        |
| 5.5.1      | 碳排放贸易与碳市场的产生           | 115        |
| 5.5.2      | 国际碳市场的发展状况             | 116        |
| 5.6        | 我国的二氧化碳减排              | 119        |
| 5.6.1      | 结构减排潜力巨大               | 119        |
| 5.6.2      | 生活行为对碳排放影响很大           | 120        |
| 5.6.3      | 出口贸易隐含大量碳排放            | 120        |
| 5.6.4      | 技术进步能有效减少碳排放           | 121        |
| 5.6.5      | 碳税政策能抑制碳排放增长           | 121        |
| 5.6.6      | 国际碳市场是减排的有效机制          | 122        |
|            | 本章小结                   | 122        |
| <b>第6章</b> | <b>能源投融资</b>           | <b>124</b> |
| 6.1        | 能源投融资概述                | 124        |

|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| 6.1.1      | 能源投融资的基本内涵             | 124        |
| 6.1.2      | 世界能源投资概况               | 124        |
| 6.2        | 能源投融资的特点               | 126        |
| 6.2.1      | 能源部门的资金特征              | 126        |
| 6.2.2      | 能源部门的资金来源特征            | 126        |
| 6.2.3      | 世界主要国家的能源投资            | 128        |
| 6.2.4      | 世界主要国家的能源融资模式及特点       | 132        |
| 6.3        | 能源投融资的主要影响因素           | 135        |
| 6.3.1      | 国家能源战略                 | 135        |
| 6.3.2      | 政策导向                   | 135        |
| 6.3.3      | 宏观经济环境                 | 136        |
| 6.3.4      | 能源市场化和金融市场发育程度         | 137        |
| 6.3.5      | 资源禀赋和开放程度              | 138        |
| 6.3.6      | 能源企业投资回报率、投资风险、资本结构    | 138        |
| 6.4        | 能源投资效益与风险              | 139        |
| 6.4.1      | 能源行业效益的特征              | 139        |
| 6.4.2      | 能源投资风险的内涵及主要影响因素       | 140        |
| 6.5        | 能源融资原则与融资环境            | 144        |
| 6.5.1      | 能源融资模式选择的基本原则          | 144        |
| 6.5.2      | 能源融资环境分析及展望            | 146        |
| 6.6        | 能源融资战略——以中国能源融资模式为例    | 149        |
| 6.6.1      | 中国煤炭行业融资模式             | 149        |
| 6.6.2      | 中国油气行业融资模式             | 149        |
| 6.6.3      | 中国电力行业融资模式             | 150        |
| 6.6.4      | 中国可再生能源与新能源行业融资模式      | 151        |
|            | 本章小结                   | 151        |
| <b>第7章</b> | <b>能源技术政策</b>          | <b>152</b> |
| 7.1        | 能源技术-经济范式的变迁           | 152        |
| 7.1.1      | 自然增长与能源替代(1973年以前)     | 153        |
| 7.1.2      | 能源危机与技术多样化(1973—1992年) | 154        |
| 7.1.3      | 面向清洁、可持续能源系统(1992年至今)  | 156        |
| 7.2        | 石油危机与能源技术 R&D 投入响应模式   | 157        |
| 7.2.1      | 经济、能源系统的需求和供给调整        | 158        |
| 7.2.2      | 能源技术研发对石油危机的响应模式       | 160        |
| 7.3        | 能源技术研发投入组合研究           | 163        |
| 7.3.1      | 熵统计                    | 163        |
| 7.3.2      | 能源研发投入在技术维度的变化         | 165        |

|            |                      |            |
|------------|----------------------|------------|
| 7.3.3      | 能源研发投入在国家维度的变化       | 167        |
| 7.4        | 我国能源技术替代路线与可再生能源技术政策 | 170        |
| 7.4.1      | 化石能源技术替代路线           | 170        |
| 7.4.2      | 案例研究：我国的煤液化技术        | 172        |
| 7.4.3      | 可再生能源技术政策分析          | 174        |
| 7.5        | 对我国的启示               | 177        |
|            | 本章小结                 | 179        |
| <b>第8章</b> | <b>能源安全</b>          | <b>181</b> |
| 8.1        | 能源安全概述               | 181        |
| 8.1.1      | 能源安全的定义              | 181        |
| 8.1.2      | 能源安全的内涵及演变           | 182        |
| 8.1.3      | 能源安全对社会经济的影响         | 183        |
| 8.2        | 能源安全综合评价             | 186        |
| 8.2.1      | 能源安全综合评价指标体系         | 186        |
| 8.2.2      | 世界能源安全预警现状           | 188        |
| 8.2.3      | 典型国家能源供应安全比较         | 189        |
| 8.3        | 能源安全预警               | 196        |
| 8.3.1      | 能源安全预警概述             | 196        |
| 8.3.2      | 能源安全预警体系研究框架         | 198        |
| 8.3.3      | 能源安全预警系统构建思路         | 203        |
| 8.4        | 国际能源合作               | 204        |
| 8.4.1      | 国际能源合作的目的与意义         | 204        |
| 8.4.2      | 国际能源合作的形式            | 205        |
| 8.4.3      | 国际能源合作项目风险控制         | 206        |
| 8.5        | 能源外交                 | 206        |
| 8.5.1      | 能源外交的目的              | 207        |
| 8.5.2      | 能源外交的形式              | 207        |
| 8.5.3      | 我国能源外交的基本状况          | 207        |
| 8.6        | 我国能源安全现状及预警          | 209        |
| 8.6.1      | 我国能源安全现状             | 209        |
| 8.6.2      | 我国能源安全面临的挑战          | 209        |
| 8.6.3      | 提高我国能源安全政策建议         | 211        |
|            | 本章小结                 | 213        |
|            | 拓展阅读：从博弈角度看中俄能源合作    | 213        |
| <b>第9章</b> | <b>能源贫困</b>          | <b>216</b> |
| 9.1        | 能源贫困的概念及现状           | 216        |

|               |                            |            |
|---------------|----------------------------|------------|
| 9.1.1         | 能源贫困的概念                    | 216        |
| 9.1.2         | 全球能源贫困现状                   | 216        |
| 9.1.3         | 我国能源贫困现状                   | 217        |
| 9.2           | 能源贫困的影响                    | 218        |
| 9.2.1         | 能源贫困阻碍千年发展目标的实现            | 218        |
| 9.2.2         | 能源贫困导致严重的健康损失              | 219        |
| 9.2.3         | 能源贫困制约经济发展                 | 220        |
| 9.3           | 能源贫困的测度                    | 221        |
| 9.3.1         | 设线法                        | 221        |
| 9.3.2         | 最低能耗法                      | 221        |
| 9.3.3         | 主观测度法                      | 222        |
| 9.3.4         | 区域比较法                      | 222        |
| 9.4           | 我国区域能源贫困比较                 | 223        |
| 9.4.1         | 指标构建                       | 224        |
| 9.4.2         | 结果分析                       | 224        |
|               | 本章小结                       | 226        |
| <b>第 10 章</b> | <b>能源消费与公众健康</b>           | <b>227</b> |
| 10.1          | 城市环境健康效应经济评估               | 227        |
| 10.1.1        | 环境健康效应                     | 227        |
| 10.1.2        | 环境健康效应测度                   | 228        |
| 10.1.3        | 我国城市大气环境污染造成的健康效应评估        | 228        |
| 10.2          | 部门污染物排放对公众健康效应的经济评估        | 230        |
| 10.2.1        | 吸入因子                       | 230        |
| 10.2.2        | 部门污染物排放                    | 231        |
| 10.2.3        | 健康效应和经济损失评估                | 231        |
| 10.2.4        | 我国 24 个部门污染物排放对公众健康效应的经济评估 | 232        |
| 10.3          | 边际健康效应的经济损失评估              | 236        |
| 10.3.1        | 部门边际健康效应的经济损失评估            | 236        |
| 10.3.2        | 能源边际健康效应的经济损失评估            | 236        |
| 10.3.3        | 我国边际健康效应的经济损失评估            | 236        |
|               | 本章小结                       | 239        |
|               | 参考文献                       | 240        |



# 能源与经济

能源问题已经演变成成为影响全球政治经济格局和人类社会发展的重大战略问题。在宏观的科学研究层面上,能源问题在很大程度上是经济问题,但归根结底是发展问题。本章首先简要概述能源与经济之间的关系;其次,总结归纳能源消费与经济增长关系的主要研究观点;最后结合本书的研究问题,简要阐述在可持续发展理论下能源经济学的一些新发展。

## 1.1 能源与经济关系概述

现代经济社会,能源作为一种重要的物质,既充当工业的血液,又与我们的日常生活息息相关,能源的基础性和战略性地位受到人们越来越广泛的关注。能源不仅作为生产要素参与经济生产,还作为其他生产要素的燃料、动力参与产品生产,整个经济运转的规模和程度均受到能源供应的制约。无论柴草时期、煤炭时期还是石油时期,每一次能源发展的飞跃都推动了社会生产力的发展,引起了生产技术的变革(彭补拙,濮励杰等,2007)。能源与经济相辅相成,相互制约,一方面,经济发展需要一定量的能源投入,从而带动能源消费;另一方面,经济发展为能源开发利用提供了技术和物质条件。

### 1.1.1 经济发展带动能源消费

能源是重要的生产要素,不能被其他要素完全替代;同时能源也是重要的生活资料,不能被其他消费品完全替代。工业革命以来,世界经济和能源消耗均保持了较快的增长态势。1980—2009年间,世界生产总值(GWP)与能源消耗量的相关系数高达0.995;GWP和能源消费年均分别增长2.8%和1.8%;单位GWP能耗累计下降了23%。全球经济每增长1%,大约带动能源需求增长0.64%(魏一鸣等,2010)。未来世界能源需求增长仍然较快。据国际能源署(IEA,2010)预测,按照目前的政策,2008—2035年世界能源消费总量年均增长1.4%,达到180.5亿吨标准油。

人类对能源利用技术的突破极大地推动了人类社会的经济增长。在18世纪之前,能源消费主要是为了满足生活需要,瓦特蒸汽机的发明促进了能源在生产领域中的大量使用,煤炭在蒸汽机中的大量利用,极大地提高了人类的劳动生产率,并由此开始引发资本主义的产业革命,极大地促进了人类文明的发展。随着19世纪中叶石油资源的发展,人类对能源的利用进入了又一个全新的时代。现代社会生产离不开能源要素的投入,没有能源就不可能形成现实的生产能力。新类人量通而的士以 80 育, 变变到产的主发平 20 主 经济发展对能源的需求主要表现在以下两个方面:

#### 1. 经济发展对能源需求总量不断增加

在一定经济发展阶段及产业结构下,经济发展水平越高,经济增长速度越快,国民生

产和生活所耗费的能源总量也越多,并随着生产规模的扩大及消费结构的提升,能源的消耗也随之增加。

表 1-1 显示,1991—2010 年间,伴随着经济的快速发展,我国能源消费总量呈不断增加的趋势,尤其在 2003 年和 2004 年,能源消费增加的速度超过了经济增长的速度,即能源消费弹性系数大于 1,经济增长严重依赖能源资源的过度消耗。

表 1-1 我国能源消费总量与经济增长

| 年份   | 总量/万吨标准煤 | 增速/% | GDP 增速/% | 年份   | 总量/万吨标准煤 | 增速/% | GDP 增速/% |
|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|
| 1991 | 103 783  | 5.1  | 9.2      | 2001 | 150 406  | 3.3  | 8.3      |
| 1992 | 109 170  | 5.2  | 14.2     | 2002 | 159 431  | 6    | 9.1      |
| 1993 | 115 993  | 6.2  | 14       | 2003 | 183 792  | 15.3 | 10       |
| 1994 | 122 737  | 5.8  | 13.1     | 2004 | 213 456  | 16.1 | 10.1     |
| 1995 | 131 176  | 6.9  | 10.9     | 2005 | 235 997  | 10.6 | 11.3     |
| 1996 | 135 192  | 3.1  | 10       | 2006 | 258 676  | 9.6  | 12.7     |
| 1997 | 135 909  | 0.5  | 9.3      | 2007 | 280 508  | 8.4  | 14.2     |
| 1998 | 136 184  | 0.2  | 7.8      | 2008 | 291 448  | 3.9  | 9.6      |
| 1999 | 140 569  | 3.2  | 7.6      | 2009 | 306 647  | 5.2  | 9.1      |
| 2000 | 145 531  | 3.5  | 8.4      | 2010 | 324 939  | 6.0  |          |

资料来源:《中国统计年鉴》2011。

## 2. 经济增长对能源需求质量不断提高

俄裔美国著名经济学家库兹涅茨认为,现代经济增长不仅仅是一个总量问题,“如果不去理解和衡量生产结构的变化,经济增长是难以理解的”。对于能源而言,仅仅是能源消费总量的增加并不一定能满足经济发展的需要,能源消费结构合理、能源效率提高才是经济发展的重要保障。

人类历史经历了从柴草到煤炭、从煤炭到石油,目前正在从石油到天然气和可再生能源的三次重大的能源转变。每次转变,都伴随着能源技术的进步,能源品种逐步丰富,能源效率显著提高。不同能源品种燃烧产生的热值和温室气体差别较大,同为化石能源,原煤、原油、天然气燃烧的热值分别为 20.9MJ/kg,41.8MJ/kg,39.0MJ/m<sup>3</sup>,原油是原煤热值的一倍。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC,2006)公布的二氧化碳排放因子显示,同为 1TJ 热值的原煤燃烧产生的二氧化碳为 87 300kg,原油和天然气分别为 71 100kg 和 54 300kg,因此相比较而言,原油比原煤,天然气比原油更高效、更安全。

经济发展所处的阶段越高,经济体对能源质量的要求就越高。长期以来,世界各国的经济发展主要依靠化石能源,化石能源的燃烧产生了大量的二氧化碳、二氧化碳是温室气体的主要部分,造成大气污染,加剧全球气候变暖。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)发布的第 4 次评估报告指出:过去 50 年发生的气候变暖,有 90% 以上的可能是人类活动造成的,其中又以煤炭、石油、天然气等化石燃料的燃烧为主。因此,只有不断减少化石能源的使用量,增加清洁的可再生能源使用量,才能实现经济增长对高质量能源资源需求的目标。

目前中国对能源的需求不仅存在着总量短缺的问题,也存在着能源品种需求结构不

合理、质量不高的问题。表 1-2 显示,美国、日本等发达国家都已实现了从煤炭到石油的过渡,正朝着更清洁高效、低碳甚至无碳的天然气、核能、太阳能、风能等方向发展,而煤炭在我国能源消费结构中仍然占据绝对主导地位,是世界上少有的几个以煤炭为主的国家,能源品种多样化,能源结构转换是保证我国经济可持续发展过程中亟须解决的问题。

表 1-2 能源消费结构

| 2009 年 |       |       |       |       |      |           |     | 2010 年 |       |       |       |      |           |     |
|--------|-------|-------|-------|-------|------|-----------|-----|--------|-------|-------|-------|------|-----------|-----|
|        | 石油    | 天然气   | 煤炭    | 核能    | 水电   | 可再生<br>能源 | 总计  | 石油     | 天然气   | 煤炭    | 核能    | 水电   | 可再生<br>能源 | 总计  |
| 美国     | 37.80 | 26.69 | 22.51 | 8.63  | 2.84 | 1.53      | 100 | 37.19  | 27.17 | 22.95 | 8.41  | 2.57 | 1.71      | 100 |
| 中国     | 17.74 | 3.68  | 71.16 | 0.73  | 6.37 | 0.32      | 100 | 17.62  | 4.03  | 70.45 | 0.69  | 6.71 | 0.50      | 100 |
| 印度     | 31.47 | 9.56  | 52.22 | 0.79  | 5.01 | 0.96      | 100 | 29.66  | 10.63 | 52.95 | 1.00  | 4.81 | 0.96      | 100 |
| 日本     | 42.01 | 16.64 | 23.00 | 13.75 | 3.48 | 1.13      | 100 | 40.25  | 16.98 | 24.70 | 13.21 | 3.84 | 1.02      | 100 |
| 韩国     | 43.54 | 12.90 | 28.99 | 14.13 | 0.27 | 0.17      | 100 | 41.41  | 15.14 | 29.81 | 13.12 | 0.33 | 0.18      | 100 |
| 世界     | 34.40 | 23.42 | 29.09 | 5.40  | 6.48 | 1.21      | 100 | 33.56  | 23.81 | 29.63 | 5.22  | 6.46 | 1.32      | 100 |

资料来源：英国石油公司(BP)2011。

能源对经济的制约作用在能源供应充足时表现得不明显,然而一旦能源供应滞后,各个行业便会因为动力不足而陷入发展停滞状态,导致经济萧条、失业率大幅上升。如第一次石油危机期间,1972 年美国 and 日本的 GDP 增长率分别为 5.6% 和 8.4%,而 1974 年分别下降到 -0.47% 和 -1.2% (世界银行,2010)。美国经济的联邦预算赤字从 1974 年的 47 亿美元增加到 1975 年的 452 亿美元;通货膨胀率从 1972 年的 3.4% 上升到 1974 年的 12.2%;失业率从 1973 年的 4.9% 上升到 1975 年的 8.5%;生产率从 1972 年的 6.6% 降至 1974 年的 1.9%。因此,在工业化社会,能源供应不足已经成为经济增长的重要制约因素,能源在经济发展中的作用和地位受到前所未有的重视。

1.1.2 经济发展为能源开发利用提供了先决条件

1. 经济发展为能源开发利用提供了坚实的技术基础

经济的快速发展使得科学教育得到迅速发展,科技水平迅猛提高,随着人类对能源科学原理认识的不断深入和能源利用技术的不断提升,推动新的能源形式进入能源供应系统,这是主导能源更替的主要原因。同时,经济发展和教育科技水平提高培养了高素质的人才,这样可以对能源利用方法进行改进,从而提高其利用效率。

作为将来替代化石能源的新能源和可再生能源,具有产业技术含量高,涉及学科多等特点,必须依靠先进的科学技术才能实现对这些能源的有效开发利用。例如,大、中型风力发电机组的研制,涉及空气动力学、流体力学、微电子、自动控制等多种高新技术,经济的高速发展带动各个领域的学科技术迅速发展,为可再生能源技术的发展提供了前所未有的机遇。

2. 经济发展为能源开发利用提供了必要的物质基础

能源资源被开发出来,并加以利用,必须具备一定的物质手段。进入工业化时代以来,能源资源的开发工程都具有投资额大、建设回收期长、不确定因素复杂等特点,没有足

够的财力、物力以及技术水平保证是无法完成的。经济发展的水平决定着对能源工业的资金、技术的支持力度,也极大地制约着能源开发利用的规模、程度和水平。技术进步以及经济的发展为开发利用能源提供了物质手段。例如,海洋能资源的开发存在着能量密度低,受海水腐蚀,海生物附着,大风、巨浪、强流等环境动力作用影响等问题,致使海洋能量转换装置设备庞大、材料要求强度高、防腐蚀性性能好,设计施工技术复杂,只有经济发展到一定程度,才能为海洋能资源的开发利用提供这些必要的物质基础,因此,经济的发展程度制约着能源开发利用的规模 and 水平(吴明明,2011)。

## 1.2 能源与经济增长

### 1.2.1 经济增长的源泉

#### 1. 古典经济增长理论

经济增长的源泉是经济增长问题的核心。古典经济学关注物质资本对经济增长的作用,认为是物质资本的积累推动了经济增长。其中代表性的工作当推哈罗德-多马模型。

英国经济学家哈罗德(Harrod R. F.)与美国经济学家多马(Domar E. D.)首次运用数理方法研究资本主义经济在波动中如何实现长期增长,是现代经济增长理论中最早提出的、相对完整的增长模型,西方主流经济学界一直将其看作是现代经济增长理论的开端。哈罗德和多马在不存在政府干预、国际贸易的封闭经济下,假设全社会只生产一种产品,储蓄占经济总产出的一个固定比例,生产只使用资本和劳动力两种要素,劳动力按固定增长率增长,生产规模报酬不变,不存在技术进步等条件下,以凯恩斯提出的经济均衡增长条件:储蓄等于投资作为分析的基础,推导出该模型的基本方程(1-1)和经济实现均衡增长的条件(1-2)。

$$g = \frac{\Delta Y}{Y} = \frac{s}{v} \quad (1-1)$$

$$g_A = g_w = g_N \quad (1-2)$$

其中, $g$ 表示经济增长率, $Y$ 为经济总产出, $s=S/Y$ ,表示社会平均储蓄率; $v=K/Y$ ,表示经济中的资本-产出比; $g_A=s/v$ ,表示实际经济增长率; $g_w=s_d/v_d$ ,表示有保证的经济增长率,其中, $s_d$ 表示人们愿意进行的储蓄率, $v_d$ 表示追求最大利润的厂商满意的资本-产出比; $g_N=n$ 表示经济的自然增长率, $n$ 为劳动力增长率。

方程(1-1)说明经济增长率的决定因素为储蓄率和资本-产出比,强调经济增长的原动力是资本的投入,由于哈罗德-多马模型假设不存在技术进步,因而资本-产出比不变,故储蓄率是决定一国经济增长的惟一因素,即经济中储蓄率越高,经济增长速度就越快。

方程(1-2)说明经济实现稳定增长的条件,表明经济实现充分就业条件下的稳定增长,要求实际经济增长率 $g_A$ 、有保证的经济增长率 $g_w$ 、自然增长率 $g_N$ 相等。由于 $g_A=g_w=g_N$ 只能在偶然的情况下实现,因此,均衡的道路十分狭窄,经济一旦发生偏离,偏离不但不会自行矫正,还会产生更大的偏离,被喻为“刀锋上的均衡增长”。

#### 2. 新古典经济增长理论

针对哈罗德-多马模型的局限性,美国经济学家罗伯特·索洛(Solow R.)和英国经



济学家斯旺等人对其进行了修正和补充,后来被英国经济学家米德(Mead J. E.)系统表述并加以完善,称为索洛-斯旺模型,模型表述如下:

- 假设生产函数  $Y=f(K,L)$  满足:
- (1) 边际产品为正且递减;
  - (2) 规模报酬不变;
  - (3) 满足稻田(Inada)条件(Inada, 1963)。

此外,假设人口外生,且以不变的速率  $n(\geq 0)$  增长,则可推导出索洛-斯旺模型的基本方程(1-3)和实现经济增长的条件方程(1-4)。

$$\dot{k} = sf(k) - (n + \delta)k \quad (1-3)$$

$$sf(k^*) = (n + \delta)k^* \quad (1-4)$$

其中,  $k=K/L$ , 表示人均资本存量,  $f(k)=F(K,L)/L=F(K/L,1)=F(k,1)$ , 表示人均产出,  $\dot{k}=dk/dt$ , 表示人均资本存量变化率,  $\delta(>0)$  为资本折旧率,  $s(0 \leq s \leq 1)$  为外生的储蓄率。

索洛-斯旺增长模型表明,在均衡增长路径下人均增长率为零,这与一个多世纪以来正的人均增长率的经验事实不符(Barro and Robert et al. 1995)。导致索洛-斯旺模型中人均增长率为零的根本原因是递减的资本报酬。

新古典经济增长理论在索洛-斯旺模型基础上引入外生的技术进步,用于消除收益递减引致的人均增长率为0,解释经济持续增长的动力问题。并通过在总量生产函数中引入技术进步因素,从经验层次分析技术进步对经济增长的贡献率。即将总量生产函数修正为

$$Y = A(t)f(K, L)$$

如果生产函数采用 Cobb-Douglas 函数形式,则可推导出

$$\frac{\dot{Y}}{Y} = \frac{\dot{A}}{A} + \omega_K \frac{\dot{k}}{K} + \omega_L \frac{\dot{L}}{L} \quad (1-5)$$

其中,  $A(t)$  表示不受经济系统内任何变量影响的外生技术变化因素,  $\omega_K, \omega_L$  分别为资本和劳动的产出弹性。

根据式(1-5)可以测算技术进步对经济增长的贡献率( $= (\dot{A}/A)/(\dot{Y}/Y)$ ) (陶磊, 2008)。

### 3. 内生经济增长理论

内生经济增长理论认为,经济增长不是外部力量,而是经济体系的内部力量作用的结果。新古典经济增长理论在解释长期经济增长机制中的资本持续积累可能性时,将其归结为外生的技术进步因素,为了解决这一问题内生增长理论应运而生。内生增长理论主要是围绕技术进步内生化的展开的,试图从经济系统的内部因素解释技术进步。

内生增长理论以罗默(Romer P.)和卢卡斯(Lucas R.)为代表。罗默(Romer, 1986)以阿罗的“边干边学”概念为基础,提出了以知识生产和知识溢出为基础的具有内生技术变化的增长模型。在该模型中,由于知识溢出的存在,资本的边际生产率不会因固定生产要素(劳动)的存在而无限降低,稻田条件不再成立,因此,该模型的结论是收益递增在长

期增长中是必不可少的,而且在这个假设下,也完全可以得到竞争性均衡(赵东奎,2005)。

20世纪60年代至70年代初,舒尔茨的人力资本理论受到广泛关注,人力资本中的技术含量被认为是比资源禀赋更为重要的促进经济增长的因素。卢卡斯认为,人力资本的积累可以提高劳动者自身的生产率,人力资本的积累还具有外部性,正是这种外部性,使得全社会劳动生产率都得到了提高,进而使得产出具有收益递增效应。

无论是罗默的以知识生产和知识溢出为基础的内生增长理论,还是卢卡斯以人力资本外部性为基础的内生增长理论,他们关于内生技术进步和收益递增的理论分析有助于更深入地分析经济增长过程,探寻经济增长的机理和源泉。

#### 4. 主流经济增长理论中的能源要素

无论是古典经济增长理论的物质资本决定论还是新古典和内生经济增长理论的技术进步决定论,主流经济增长理论都将能源看作是由资本、劳动、土地等基本生产要素产生的中间变量,是可以被替代的外生变量。因此,能源在生产中所处的地位是非主要的,即使受到能源约束,经济也可以得到持续增长。

上述主流经济增长理论关于能源要素与经济增长关系的观点基于以下三点假设:

第一,在逻辑上,假定能源是现实存在的和非枯竭的,这一假设源于当时能源获取相对比较容易,且价格低廉的现实;

第二,在认识上,把不同生产要素同质化,忽略能源要素的特性;

第三,在论证上,把复杂、具体的能源要素问题简单抽象为生产成本问题,认为经济增长正在大幅度地减少对自然资源的依赖,即使存在资源供给的某些瓶颈,技术进步等因素可以抵消因为能源和资源的递减与约束而引起的生产成本的上升(李金铠,2009)。

20世纪70年代,两次重大的石油危机使西方发达国家经济遭受重创,人们逐渐认识到,能源资源是经济增长的重要物质保障和必要条件,是经济增长的原动力,是影响经济发展的一个重要因素,技术进步不能完全解决能源与资源短缺对经济增长的约束,需要将能源从资本中剥离出来作为一种单独要素投入,考察其与经济增长及其他要素投入的关系。此后,经济学家尝试将能源、自然资源以及环境污染问题引入新古典增长理论中。

Grimaud and Rouge(2003)假定技术进步取决于用于研发的劳动力和已有创新,并将不可再生资源加入内生增长模型中,分析了最优经济增长路径。此后在 Grimaud and Rouge 的一系列研究(2004,2005,2008)中,研究的问题、方法不同,但在这些研究中,都毫无例外地将不可再生资源作为独立的生产要素纳入模型。李金铠(2009)借鉴金-赖贝罗线性技术内生增长模式中将不可再生资源纳入模型和将复合资本品进行分解的思路,把能源消费和环境污染作为独立要素融入生产函数,探讨基于能源和环境约束下经济实现可持续增长和发展的可能性和条件。张明慧等(2004)在 Cobb-Douglas 生产函数基础上测度能源消费对中国经济增长的贡献得出,中国能源消费弹性系数为 1.437,即能源消费增加 1%将导致经济增长 1.437%。能源需求对经济增长的作用不容忽视。

### 1.2.2 能源消费与经济增长因果关系

大量文献对能源消费与经济增长之间的因果关系进行了实证检验,检验结果由于所用检验方法、检验数据等不同,结果各异,概括起来,主要有以下四种: