



中国工业领域能源生产力评价

**Construction and case analysis of energy productivity evaluation system
in industry field**

上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

2017年6月20日

项目信息

项目资助号:G-1509-23752

Grant Number: G-1509-23752

项目期: 09/01/2015 - 08/31/2016

Grant period: 09/01/2015 - 08/31/2016

所属领域:工业

Sector: Industry

项目概述: 针对中国工业能耗在国民经济总能耗占比大的特点, 项目选择我国工业领域开展能源生产力指标体系研究。项目通过建立中国工业领域能源生产力评价体系, 选择上海市作为城市代表进行工业领域能源生产力评价, 并确定上海市工业领域 2030 能源生产力目标。以此为基础探索如何优化能源消费方式、提高能源生产力, 促进经济的持续增长和能源可持续发展, 形成上海市中长期能源生产力目标及实施途径政策建议。项目会选择典型工业园区进行案例分析以进一步在政府、企业、公众之中推广能源生产力这一概念。项目将对能源生产力评价在我国的推广、应用起到重要的促进作用, 通过能源生产力这一评价体系的广泛应用全面综合的评价我国工业领域的能源使用状况, 真正实现能源消耗降低、经济发展、环境排放降低、社会福利提高等多方的多赢结果。项目的实施不仅对我国工业领域能源生产力评价体系的应用以及节能减排将起到示范作用, 从而促进工业领域提高能源生产力; 同时将对能源生产力这一评价指标体系在全国乃至各地区、各个行业的应用起到重要引领作用。

Project Discription: The assessment index and methodology of energy productivity in China's industrial sector will be established in this project. Medium and long-term energy productivity targets and the implementation of the policy recommendations for Shanghai will be formed by using the assessment index and methodology. On the basis of this, it explores how to optimize energy consumption patterns, increase energy productivity, promote sustainable economic growth and energy sustainable development. Case analysis of the typical industrial park, it can further promote the extention the concept of energy productivity in the government, enterprises and the public. Project execution play an important promoting role on the popularization and application of energy productivity assessment in China. China's industrial sector energy use status can be evaluated comprehensively be the energy productivity assessment system build in this project. And also truly realize the reduction of energy consumption and environmental emissions, improving the economic development and social welfare, and harvest their multi-party win-win results. Project implementation of the energy productivity evaluation in the popularization and application of our country to an important role in promoting, through energy productivity in the evaluation system of the widely used comprehensive evaluation of China's industrial sector energy use situation, the real energy consumption decreased, reduce the economic development, environmental emissions, improving social welfare and

other multi-party win-win results. The implementation of the project will not only have a demonstration effect on the assessment system of energy productivity in the industrial field, but also can promote the industry to improve the energy productivity. At the same time, the assessment index system of energy productivity will play an important leading role in the industry sector and even the whole country.

项目成员：黄震、谢晓敏、于立军、张庭婷、姚丽珍、李加良、钟蓉、王黎明、郝存、夏淳
Project team: Zhen Huang, Xiaomin Xie, Lijun Yu, Tingting Zhang, Lizhen Yao, Jialiang Li, Rong Zhong, Liming Wang, Cun Hao, Chun Xia

关键词：能源生产力，工业领域，评价体系

Key Word: Energy productivity, Industry field, Evaluation system

本报告由能源基金会资助。
报告内容不代表能源基金会观点。

This report is funded by Energy Foundation.
It does not represent the views of Energy Foundation.

摘要

节能减排，实现低碳经济发展，已经成为当前国际社会应对气候变化所关注的焦点。2015年中国政府提出了明确的节能减排目标，并承诺到2030年使单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%~65%。要实现已制定的节能减排目标，需要在科学分析中国经济发展、能源消费与排放的特征及其区域差异的基础上，制定科学的区域节能减排发展战略。工业在产业结构中虽然占据的比例不是最高，但其能源消耗占比却是最高。囿于传统能源强度、能源效率等指标在评价行业发展的局限性，本研究以工业领域为研究对象，提出用能源生产力来衡量工业经济发展，旨在最大化工业产出的同时，还能减少投入、降低排放。

为此，本研究基于数据包络分析（DEA）和随机前沿（SFA）的方法，建立了基于全要素理论的能源生产力评价方法，并用该方法分别对“十五”、“十一五”和“十二五”期间中国各省区工业领域以及上海市各类工业行业的能源生产力变动及其影响因素进行了研究。所考虑的投入要素包括资本、劳动力、能源，产出要素包括期望产出工业增加值以及非期望产出CO₂。在对比不同方法的基础上，本报告选用合适的方法对上海市某一工业园区的能源生产力进行了典型性分析。最后，报告还预测了2030年上海市工业能源生产力，并预测了达到该能源生产力下上海市的工业领域CO₂排放量。

DEA方法下得到的有关结果如下：

首先，规模效益不变（CRS）假设下的工业生产效率小于或等于规模效应变化（VRS）假设下的工业生产效率；非期望产出CO₂作为投入处理时的工业生产效率小于或等于作为副产出处理时的工业生产效率。

其次，对中国各省市工业能源生产力的实证结果表明：中国工业领域能源生产力的提高受技术进步的驱动，当CO₂作为投入时，碳排放-能源比对能源生产力的提高起抑制作用；从地区分布来看，中国东部沿海地区工业能源生产力相对较高，西部地区则相对较低，并且在“十二五”期间这种差距有拉大的趋势，反映出中国地区发展的不均衡性；从影响因素分解结果可知，资本投入对中国能源生产力的提高也有重要的促进作用；能源投入在“十一五”期间对所有经济区域工业能源生产力提高表现为

抑制作用，但到“十二五”期间这种抑制作用减小，并且部分地区表现为促进作用。

再者，从上海市各类工业行业的能源生产力变动结果可知：技术进步和资本投入对上海能源生产力的提高都起到了促进作用，当 CO₂ 作为投入处理时，碳排放-能源比在一定程度上限制了能源生产力的提高；劳动力投入和产出结构对上海市工业能源生产力的影响较小；能源投入对上海工业中的制造业从 2009 年以来起到重要的促进作用，但对电力、热力、燃气及水生产和供应业起抑制作用。此外，从能源生产力水平方面来看，工业产业附加值越高，其能源生产力也越高。能源密集型工业产业能源生产力提高的主要阻力来源于能源投入和碳排放。

SFA 得到的主要结果如下：

首先，采用参数法中的随机前沿分析法对我国各省市工业领域的能源生产力进行了实证研究。结果表明，资本和劳动力是我国工业能源生产力的驱动性因素，而能耗和碳排放则是抑制因素；在“十五”到“十二五”三个时期里，我国工业领域的平均生产技术效率水平较高，实际产出接近最佳前沿面产出，其中，平均技术效率水平最高的是上海，其次为北京。

其次，基于随机前沿分析法对上海市工业领域 33 个子行业进行了能源生产力实证分析。结果表明，资本是上海市工业能源生产力增长的主要驱动因素，而能耗和碳排放是抑制因素；相对于生产前沿面来说，上海市工业领域的经济产出还有 19% 的提升空间；电力、热力、燃气及水生产和供应业的技术无效率程度极高，生产点严重滞后于最优产出。

DEA 和 SFA 两种方法的对比结果表明：

两种不同的方法带来的结果不尽相同，DEA 在处理面板数据时，表现出了该法的缺陷和不足。相对于 SFA，DEA 在处理不同行业时，有很大的局限性。SFA 较为合适，可用作对能源生产力进行分解。

2030 年上海市工业能源生产力和碳排放

基于索洛余值总量生产函数，采用回归预测法，预测了 2020 年上海市工业领域的能源生产力及碳排放情况。预测结果显示，按照当前的发展情形，到 2020 年，上海市工业领域的能源生产力将达到 1.09，相比于 2013 年增长了 37%；碳排放强度将为 0.97 万吨/亿元，相比于 2013 年下降 13.4%。

2030 年上海市工业可为国家实现二氧化碳减排承诺作出贡献。情景一中 2030 年

上海市工业领域的能源生产力为 1.47 亿元/吨标煤，相比 2013 年提高了 83.8%，碳排放为 8063.31 万吨，相比 2013 年增加了 42.6%，单位生产总值碳排放为 0.82 万吨/亿元，相比 2013 年减少了 26.8%；情景二中，2030 年上海市工业领域的能源生产力为 1.21 亿元/吨标煤，相比 2013 年提高了 51.3%，碳排放为 3619.59 万吨，相比 2013 年减少了 36.0%，单位生产总值碳排放为 0.53 万吨/亿元，相比 2013 年减少了 52.6%。

Abstract

To achieve low carbon economic development, energy saving and emission reduction has become the focus of the current international community to deal with climate change. In 2015, the Chinese government put forward a clear goal of energy conservation and emission reduction, and promised to make the carbon dioxide emissions per GDP decreased by 60%~65% by 2030 compared with that of 2005. To achieve the goal, a scientific energy conservation and emission reduction development strategy should be developed based on the scientific analysis of China's economic development. Although the proportion of industry in the industrial structure is not the highest, but its energy consumption accounts the highest of the total energy consumption. Due to the limitations of traditional evaluation index such as energy intensity, energy efficiency and others, the index of energy productivity (EP) was proposed in this study to measure the development of industrial economy, for the purpose of maximizing industrial output, reducing input, and reducing emissions.

Therefore, this study established an evaluation system of total factor energy productivity by using envelopment analysis (DEA) and stochastic frontier analysis (SFA) method. Empirical analysis were conducted with this method to evaluate the EP and related influence factors of industry in China and Shanghai during “10th Five-Year”, “11th Five-Year”, and “12th Five-Year”. In this model, the input factors considered include capital, labor, energy, while the output factors include the expected output value like industrial added value and the unexpected output of CO₂. Based on the comparisons of different method, a typical analysis was conducted on an industrial park in Shanghai as well. Besides, the energy productivity and carbon emission for Shanghai’s industry in 2030 were also predicted.

Results from DEA analysis

The results of the energy productivity evaluation model showed that the energy production efficiency under assumption of constant return to scale (CRS) is less than or equal than that of variable return to scale; the industrial production efficiency under the condition of treating undesirable output CO₂ as input is less than or equal than that of treating it as byproduct.

The empirical analysis on China's provincial industrial energy productivity showed that technical change was the main driving force to the EP improvement, while the ratio of carbon emission to energy input inhibited the EP improvement when CO₂ was treated as input. From the point of regional distribution, industrial EP in eastern coastal area of China was relatively high, while in the western region, EP was relatively low. Meanwhile, the gap is widening during the "12th Five-Year" period, which reflecting the imbalance of regional development China. The influence factor decomposition results showed that the capital input has important promoting role to the EP, energy input showed inhibitory effect to all the regional industrial EP in the "11th Five-Year" period, but in the "12th Five-Year" period, it showed promoting effects for some region.

The Shanghai's EP results showed that technical change, and capital input have positive role to the EP change, while the ratio of carbon emission to energy input has negative role to the EP change. Labor input and output structure have little effect on Shanghai's industrial energy productivity. Energy structure was positive to Shanghai's manufacturing industry since 2009, but inhibit to electricity, heat, gas and water production and supply industry. In addition, from the perspective of EP levels, the higher the industrial added value, the higher its energy productivity. The main resistances to EP increase of energy intensive industries were attributed to energy structure, and carbon emissions.

Results from SFA analysis

Firstly, the stochastic frontier analysis method is used to study the industrial energy productivity of provinces and cities in China. The results show that capital and labor force are the driving factors of industrial energy productivity in China, while energy consumption and carbon emission are the inhibitory factors. During the three period, 10th Five-Year, 11th Five-Year and 12th Five-Year, the average level of China's industrial technical efficiency is high, the actual output is close to the frontier output. What's more, Shanghai has the highest average level of technical efficiency, followed by Beijing.

Secondly, based on the stochastic frontier analysis, this paper analyzes the energy productivity of 33 sub-sectors in Shanghai's industrial sector. The results show that capital is the main driving force of industrial energy productivity in Shanghai, while energy consumption and carbon emission are the inhibiting factors. Compared with the frontier of production, there are still 19% improvement in space for Shanghai's industrial economic

output. Electricity, heat, gas and water production and supply industries have a high degree of technical inefficiency, and their productive points seriously lag behind the optimal output.

The comparison of results between DEA and SFA method

The results for the two methods are different. DEA method shows the defects and shortcomings when dealing with the panel data. Compared SFA, DEA has great limitations in dealing with different industries. SFA is appropriate and can be used to decompose energy productivity in this study.

Energy productivity and carbon emission for Shanghai industry in 2030

Based on the Solow residual value production function, the energy productivity and carbon emission of Shanghai industry in 2020 are forecasted by regression method. The forecast results show that, according to the current development, Shanghai's industrial energy productivity will reach 1.09 in 2020, a 37% increase compared to 2013. By 2020, carbon intensity will be 0.97 10000t per 0.1billion yuan, down 13.4% compared to 2013.

In 2030, Shanghai's industry could contribute to the country's commitment to achieve carbon dioxide reduction. The results in Scenario 1 showed that the energy productivity and carbon emission were 83.8% and 42.6% higher than that in 2013, while carbon emission per GDP were 26.8% lower. In Scenario 2, the energy productivity was 51.3% higher than that in 2013, while the carbon emission and carbon emission per GDP were 36.0% and 52.6% lower than that in 2013, respectively.

目 录

摘 要.....	i
Abstract.....	iv
目 录.....	1
主要缩略词说明.....	v
第一章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.1.1 中国工业领域取得的成就.....	1
1.1.2 中国工业发展带来的环境问题.....	2
1.1.3 经济新常态下的工业发展目标.....	3
1.2 中国工业能源消耗与污染物排放.....	4
1.2.1 中国主要能源消耗现状.....	4
1.2.2 工业能源消耗.....	7
1.2.3 工业污染物排放.....	9
1.3 上海市工业能源现状.....	11
1.3.1 工业发展规模.....	11
1.3.2 工业能源消耗.....	12
1.3.3 工业污染物排放.....	14
1.4 能源生产力研究现状.....	15
1.4.1 能源生产力概念.....	15
1.4.2 能源生产力国际比较.....	17
1.4.3 主要国家能源生产力发展.....	18
1.5 本报告工作简介.....	20
1.5.1 研究意义.....	20
1.5.2 研究内容.....	21
第二章 研究方法 with 文献综述.....	23
2.1 相关文献综述.....	23
2.1.1 能源生产力研究方法.....	23
2.1.2 DEA 方法国内外工作综述.....	24
2.1.3 SFA 方法国内外工作综述.....	29

2.1.4 国内外研究评述.....	30
2.2 研究理论基础.....	31
2.2.1 参数法.....	31
2.2.2 非参数法.....	34
2.2.3 参数法和非参数法对比.....	34
2.2.4 本报告研究方法概述.....	36
2.3 SFA 方法介绍	37
2.3.1 能源生产力模型设定.....	37
2.3.2 SFA 实证模型.....	39
2.4 DEA 方法介绍	40
2.4.1 生产技术集合理论.....	41
2.4.2 考虑副产出的 Shephard 产出距离函数	42
2.4.3 考虑副产出的 PDA 数学模型	45
2.5 小结.....	55
第三章 基于 DEA 的工业能源生产力实证分析	56
3.1 全国各地区工业能源生产力分析.....	56
3.1.1 数据处理.....	56
3.1.2 能源生产力计算结果.....	57
3.1.3 不考虑副产出 CO ₂ 的影响因素分解结果	58
3.1.4 考虑副产出 CO ₂ 时的能源生产力分析	60
3.1.5 全国各省市工业能源生产力影响因素分析.....	73
3.2 上海市工业各行业能源生产力分析.....	78
3.2.1 数据处理.....	78
3.2.2 能源生产效率结果.....	81
3.2.3 工业分行业影响因素分解结果.....	84
3.2.4 一类行业影响因素分解结果.....	86
3.2.5 二类行业影响因素分解结果.....	93
3.3 小结.....	94
第四章 基于 SFA 的工业能源生产力分析	96
4.1 全国各地区工业能源生产力分析.....	96
4.1.1 随机前沿生产函数估计.....	96

4.1.2	无效率模型估计.....	98
4.1.3	中国工业领域技术效率分析.....	98
4.2	上海市工业各行业能源生产力分析.....	101
4.2.1	随机前沿生产函数估计.....	101
4.2.2	无效率模型估计.....	102
4.2.3	行业技术效率分析.....	103
4.3	上海市闵行区工业企业案例分析.....	105
4.3.1	SFA 和 DEA 方法对比.....	105
4.3.2	上海市闵行工业园区案例分析.....	106
4.4	小结.....	110
第五章	上海市工业能源生产力及碳排放预测.....	112
5.1	预测模型设定.....	112
5.2	数据搜集与整理.....	114
5.2.1	能源生产力及能源输入.....	114
5.2.2	资本存量.....	115
5.2.3	劳动力投入与技术进步表征量.....	115
5.2.4	上海市工业领域碳排放.....	116
5.3	索洛余值模型估计与分析.....	116
5.3.1	模型估计结果.....	116
5.3.2	各投入要素对能源生产力的贡献率分析.....	117
5.4	2030 年上海市工业领域相关指标预测.....	118
5.4.1	常用预测方法介绍.....	119
5.4.2	2020 年上海市工业能源生产力预测.....	120
5.4.3	2020 年上海市工业碳排放预测.....	121
5.4.4	2030 年上海市工业能源生产力和碳排放预测.....	123
5.5	小结.....	125
第六章	主要结论与政策建议.....	127
6.1	主要结论.....	127
6.2	工作展望.....	130
6.3	政策建议.....	131
附录一	133

参考文献.....	135
致谢.....	139

主要缩略词说明

Btu	英热单位 (British Thermal Unit)
CRS	规模效益不变 (constant return to scale)
DEA	数据包络分析 (Data Envelopment Analysis)
GDP	国民生产总值 (Gross Domestic Product)
GHG	温室气体 (Greenhouse gases)
IEA	国际能源署 (International Energy Agency)
Mt	百万吨 (Million tonnes)
Mtoe	百万吨石油当量 (Million tonnes oil equivalent)
PDA	生产理论分解解析 (production-theoretical decomposition analysis)
SBM	松弛变量测量 (slacks-based measure)
SFA	随机前沿分析 (Stochastic Frontier Analysis)
VRS	规模效益可变 (variable return to scale)
WRI	世界资源研究所 (World Resources Institute)

第一章 绪论

1.1 引言

1.1.1 中国工业领域取得的成就

改革开放的三十多年以来，中国经济进入高速发展通道。近几年，中国经济一直保持持续快速发展，经济总量稳居世界第二位。国家统计局数据显示，1978年至2014年的37年间，中国国内生产总值（Gross Domestic Product, GDP）以年均9.48%的速度增长，国内生产总值由1978年的3650.2亿元增长到2014年的636138.7亿元^[1]。经济的发展是以能源作为巨大的推动力。统计数据可知，中国能源消费总量也从1978年的57144万吨标煤增加到2014年的425806万吨标煤^[1]，相比1978年增加了6.5倍。图1-1表示了中国近15年来能源利用的相关情况。图中可以看出，以2000年的GDP为1，中国GDP指数呈现快速上升的趋势。随着能源利用技术的提高，尽管单位GDP能源消耗从1978年的15.5吨标煤/万元降低到2000年的1.47吨标煤/万元，再到2014年的0.66吨标煤/万元，但能源消费总量仍在持续增加。据预测，中国能源消费总量还将持续增长，预计2050年的能源消费总量在 $61.91 \times 10^8 \sim 121.33 \times 10^8$ tce，而峰值年份则出现在2035~2045年^[2]。

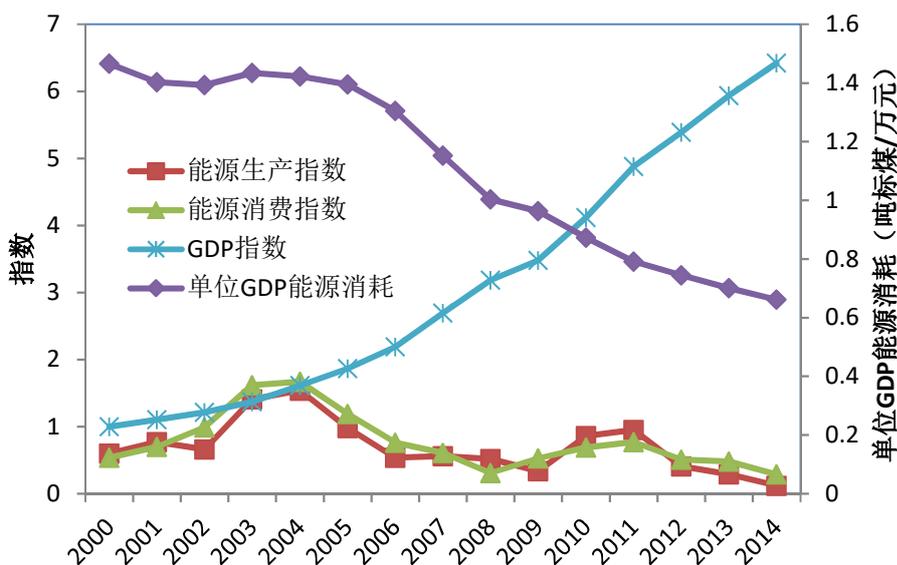


图 1-1 中国近几年能源生产、能源生产、GDP 指数及单位 GDP 能耗

中国工业领域取得成就也有目共睹。自改革开放以来，中国工业化进程可分为两个阶段：第一阶段，1978年~1999年的结构纠偏、轻重工业同步发展阶段；第二阶

段，1999 年至今，重化工业加速发展、产业结构高度化阶段。目前，中国已经进入工业化中后期阶段。从统计数据来看，1978 年至 2014 年间，中国工业增加值占国内生产总值的平均比重约为 39.61%，其中比重最高的时期是 1980 年，为 43.75%，比重最低的时期是 2014 年，为 35.87%^[1]。可见中国工业领域对中国国内生产总值有着巨大的贡献，中国工业在整个国民经济中占绝对主体地位。从 GDP 增速来看，2010~2014 年中国 GDP 的增长速度分别是 9.2%，7.8%，7.7%，7.3%，而工业在 2010~2014 年间的平均增速是 8.3%，工业仍是拉动经济增长的主要动力之一。

工业经济腾飞不仅仅表现在规模上的壮大，技术进步也得到质的提升，技术结构由改革开放之初严重依赖技术引进发展至技术引进与自主创新并重。我国已拥有 39 个工业大类，191 个种类，525 个工业小类，按照联合国产业分类来看，中国也是全世界唯一拥有全部工业门类的国家，已经形成种类齐全的工业体系。近十年来制造业的快速发展，直接促进了我国经济发展的速度、质量和效益，增强了我国在全球化格局中的国际分工地位。从国内看，建国 60 多年来，我国工业增加值占 GDP 的比重由 1952 年的 17.6% 提高到 2014 年的 35.85%，增加了 1 倍多，促进我国工业实现了由小到大的历史性转变。从国际对比来看，1990 年我国制造业占全球的比重为 2.7%，居世界第九；到 2000 年上升到 6.0%，居世界第四；2007 年达到 13.2%，居世界第二；2010 年为 19.8%，跃居世界第一。

除此之外，在工业科技方面，“嫦娥”号探月卫星成功发射、“蛟龙”号深海探测器多次成功执行任务、“天河一号”超级计算机的成功研制、国产大飞机 C919 的总装下线都是“十二五”期间可喜的成就。在工业产业结构方面，以装备制造业为代表的技术密集型、新兴产业发展速度相对较快，同属这类产业的还有原材料和消费品行业，高技术产业发展势头良好，其发展速度多年处于工业发展平均水平之上。

1.1.2 中国工业发展带来的环境问题

改革开放三十多年中国工业飞速发展奇迹的产生是以高投入为基础的，其最沉重的代价就是造成能源的巨大消耗和环境的严重污染。

近年来，中国工业能源消耗占全部能源消耗的比重一直保持在 60%~70% 之间。以 2015 年为例，中国煤、石油、天然气等一次能源的消耗总量为 3014 百万吨石油当量 (Million tonnes oil equivalent, Mtoe)，相比 2014 年增长 1.5%，高于 2014 年全

球 1.0% 的增长率，而同期 OECD 等发达国家的能源消费增长率为 0.1%，美国的能源消费增长率为 -0.9%^[3]。中国虽然放慢了能源消费的增长速度，但仍是全球能源消费增长最快的国家之一。

与此同时，虽然我国能源总产量居世界第三位，但由于人口众多，人均拥有量远低于世界平均水平，化石能源的不可再生性以及价格的大幅度攀升提高了生产成本，对未来中国工业可持续发展带来深远的影响。

能源的巨大消耗必然引发严重的环境污染。例如，中国已成为 CO₂ 排放第一大国，CO₂ 排放值从 1978 年的 1420.6 百万吨（Million tonnes, Mt）增加至 2015 年的 9153.9Mt，占了当年全球 CO₂ 排放总量的 27.3%^[3]。据国际能源署（International Energy Agency, IEA）预测^[4]，到 2040 年中国二氧化碳排放量将达到 10003.7Mt，中国因此承受着越来越多的国际二氧化碳减排压力。作为一个负责任的大国，中国在 2015 年的巴黎气候大会上提出“于 2030 年左右使二氧化碳排放达到峰值并争取尽早实现，2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65%”的减排目标。然而按照当前经济发展情况，要想达到上述目标绝非易事。环境污染给经济发展带来巨大损失，目前这种“高投入、高消耗、高污染”以及“低效率”的粗放式经济增长方式使得中国工业对资源环境的承载能力接近极限，未来发展必须走低能源消耗、高能源利用效率的道路。

1.1.3 经济新常态下的工业发展目标

中国的国内生产总值增速从 2011 年开始下降，至 2015 年，中国国内生产总值的增长速度已经降至 6.70%，中国经济进入新常态。中国社会科学院工业经济研究所发表的《2015 中国工业发展报告》指出，中国工业已经在“十二五”期间由工业化中期进入到了工业化后期阶段，这一工业进程的转变意味着中国潜在经济增长率的下降，中国经济的发展速度相对于改革开放过去的三十多年将有所下降；工业发展阶段转变的同时经济结构也需要进行相应调整；“十二五”还是政府为应对 2008 年金融为采取的经济刺激方案的消化期，受以上三点的影响中国工业承受着巨大的下行压力^[5]。2008 年金融危机的影响尚未完全褪去，国际市场消费能力不如金融危机爆发之前，中国工业传统外向型的经济已经不能支撑经济的高速发展；随着人口红利的消失、有限的能源和环境承受能力等客观因素的限制，单纯通过增加投资扩大经济规模、促进

经济发展、“高投入，高污染，低效益，低产出”的生产方式已经开始出现后劲不足的弊端；传统产业的一些核心技术和部分高新技术仍未掌握，相当一部分关键工业产品仍然严重依赖进口；产能过剩问题亟待解决。

在经济新常态伴随的出口低迷、产能过剩、产业急需转型和全球碳减排目标的多重压力下，中国经济迫切需要寻找一条低能耗、低排放、高效率的可持续发展道路，这归根到底是一条提高能源生产力、减少排放的道路。

1.2 中国工业能源消耗与污染物排放

1.2.1 中国主要能源消耗现状

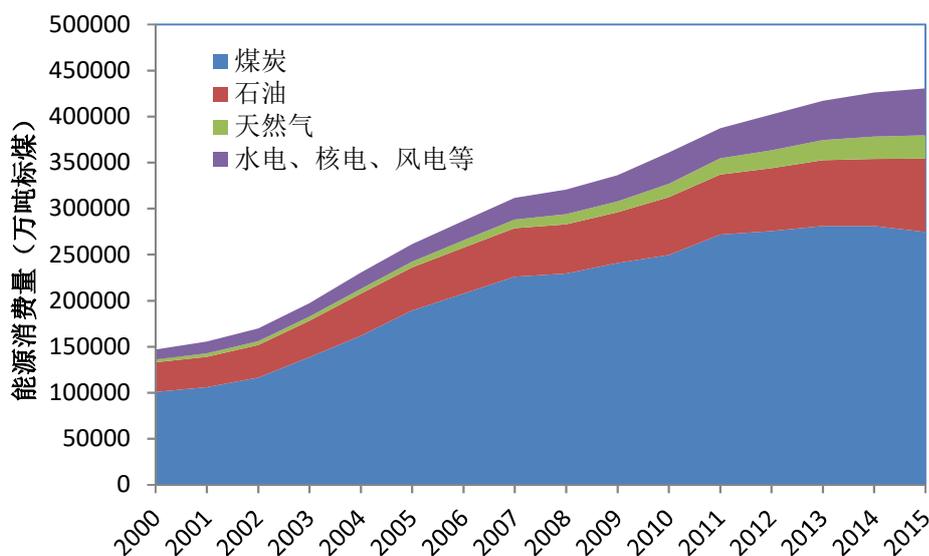
1.2.1.1 能源消费结构

中国已成为全球第一大能源消费国，2015年一次能源消费量达到3014Mtoe，占全球能源消费总量的22.9%^[3]。图1-2为中国近几年主要能源消费变化趋势，可以看出，中国一次能源消费一直都是以煤炭为主，这是由我国“富煤少油”的资源禀赋决定的。改革开放初期，为了换取外汇大量出口石油，国内部分燃油电厂也改烧煤炭^[6]，使得煤炭占能源消费总量的份额由1978年的70.7%逐步增加到1990年的最高峰，达到76.2%^[1]；随着中国能源供需紧张局面的相对缓解以及国家对能源供给结构的调整，煤炭供给受到限制，使得煤炭占能源消费总量的份额逐渐下降到2001年的最低点（68.0%），比最高值降低了8个百分点。但自2002年之后，由于经济发展速度加快，国际油价持续上涨等因素，国内能源需求持续快速增长，致使煤炭在一次能源消费结构中的份额重新回升到70%以上。2010年自今，迫于节能减排的压力，煤炭在中国能源消费的比例又开始下降，2014年该比例为66.0%^[1]，2015年下降至63.7%^[3]。总体来看，虽然煤炭消费比例在逐年下降，但煤炭在中国能源消费结构中仍占主导地位。

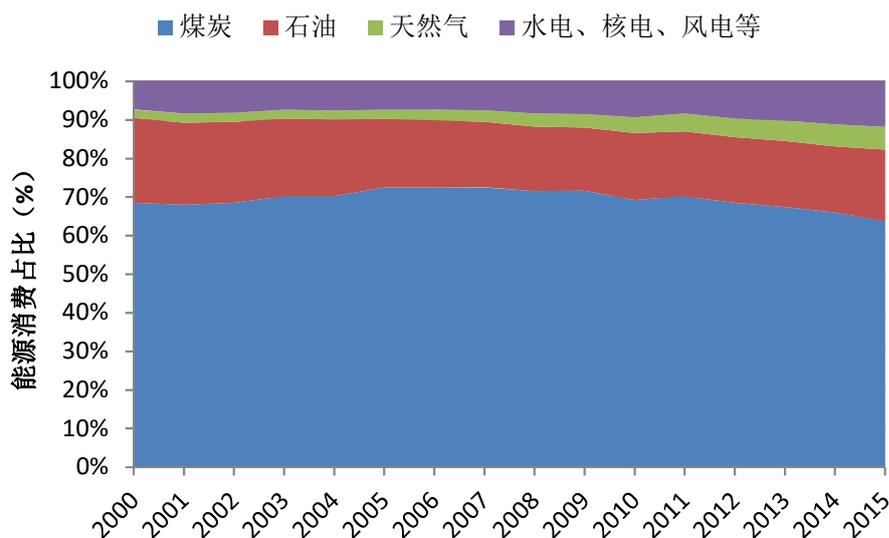
中国的石油消费量也增长迅速，石油消费总量从1978年的91.3Mt增加到2015年的559.7Mt，成为继美国之后的第二大石油消费国^[3]。如图1-2所示，尽管石油消费总量在近15年左右保持稳定快速增长，但由于其增长速度仍低于能源消费总量的增长速度，石油在能源消费结构的份额由1978年的22.7%下降到1990年的16.6%^[1]。随着中国对外石油贸易的扩大和国内煤炭供给的限制，石油占能源消费结构的比例在2000年上升到22.0%的次高点；而近年来中国对各种能源的需求与日俱增，能源供需紧张矛盾加剧，加之国际油价高涨，导致能源消费结构中煤炭的比重有所上升，石油

所占份额有所下降，2009 年仅为 16.4%。伴随着 2015 年初油价的新一轮暴跌，中国石油消费的比例在近两年维持在 17%左右，2015 年该比例为 18.6%^[3]。

天然气消费在中国能源消费结构中的比例一直较低。1978 年中国天然气消费量仅为 12.8Mtoe，2015 年消费量提高至 177.6Mtoe^[3]。从消费所占份额来看，中国天然气消费所占份额从 1978 年的 3.2%缓慢下降到 1998 年 1.8%的最低点^[1]。随着中国能源消费革命的推进，天然气的用量逐年增加，所占能源消费总量的比例也增加到 2015 年的 5.9%。



(a) 能源消费量



(b) 能源消费占比

图 1-2 中国近几年主要能源消费趋势

自 1978 年以来，中国水电等清洁能源的份额在不断增加，2001 年达到 8.4% 的最高点。随后该比例略有下降，年增长速度有所放缓。随着国家对清洁能源的重视，同时配合节能减排工作的推进，自 2003 年后，水电等清洁能源所占的比例逐年提高，2015 年达到 11.8%^[3]。中国还计划到 2030 年将非化石能源占一次能源消费的比重提高至 20%。

总体来看，中国伴随着经济的快速发展和改革开放力度的加大，其能源消费结构发生明显变化，并向着多元化方向发展。目前，中国已经基本形成了“煤为基础、多元发展”的能源消费结构。但煤炭在能源消费总量中的份额较大，给中国带来了比较严重的环境污染问题，也不利于国家节能减排战略的实施。

1.2.1.2 污染物排放

化石燃料的大量使用带来大气污染等环境问题，给人类生产和生活带来一定的威胁。

从大气环境来看，2015 年，全国开展空气质量新标准监测的 338 个地级及以上城市中，空气质量超标的城市有 265 个，占 78.4%^[7]。京津冀及周边地区（含山西、山东、内蒙古和河南）是全国空气重污染高发地区。从各指标来看^[7]，如图 1-3 所示，PM_{2.5} 年均浓度范围为 11~125 微克/立方米，平均为 50 微克/立方米，达标城市比例为 22.5%。PM₁₀ 年均浓度范围为 24~357 微克/立方米，平均为 87 微克/立方米，达标城市比例为 34.6%。SO₂ 年均浓度范围为 3~87 微克/立方米，平均为 25 微克/立方米，达标城市比例为 96.7%。NO₂ 年均浓度范围为 8~63 微克/立方米，平均为 30 微克/立方米，达标城市比例为 81.7%。O₃ 日最大 8 小时平均值第 90 百分位数浓度范围为 62~203 微克/立方米，平均为 134 微克/立方米，达标城市比例为 84.0%。CO 日均值第 95 百分位数浓度范围为 0.4~6.6 毫克/立方米，平均为 2.1 毫克/立方米，达标城市比例为 96.7%。

大气污染物如 SO₂ 等，还会带来酸雨等一系列问题。据统计^[7]，2015 年，480 个监测降水的城市（区、县）中，酸雨频率平均值为 14.0%。全国降水 pH 年均值范围在 4.2~8.2 之间。出现酸雨的城市比例为 40.4%，酸雨频率在 25% 以上的城市比例为 20.8%，酸雨频率在 50% 以上的城市比例为 12.7%，酸雨频率在 75% 以上的城市比例为 5.0%。数据表明，2015 年中国酸雨类型为硫酸型，酸雨区面积约 72.9 万平方千米，占国土面积的 7.6%，其中，较重酸雨区和重酸雨区面积占国土面积的比例分别为 1.2%

和 0.1%。酸雨污染主要分布在中国的长江以南-云贵高原以东地区，主要包括浙江、上海、江西、福建的大部分地区，以及湖南的中东部、重庆南部、江苏南部和广东中部^[7]。

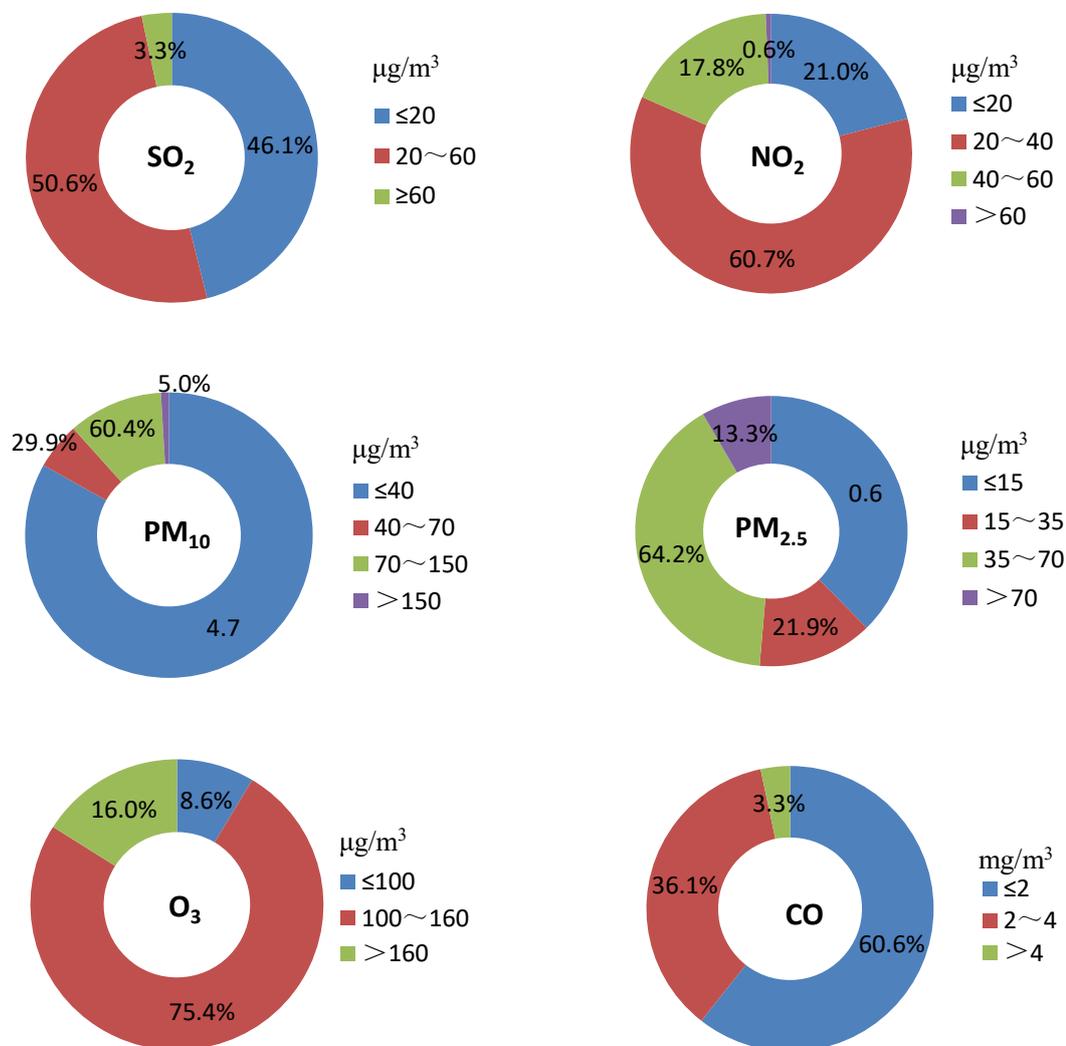


图 1-3 2015 年 338 个地级以上城市各指标不同浓度区间城市比例

1.2.2 工业能源消耗

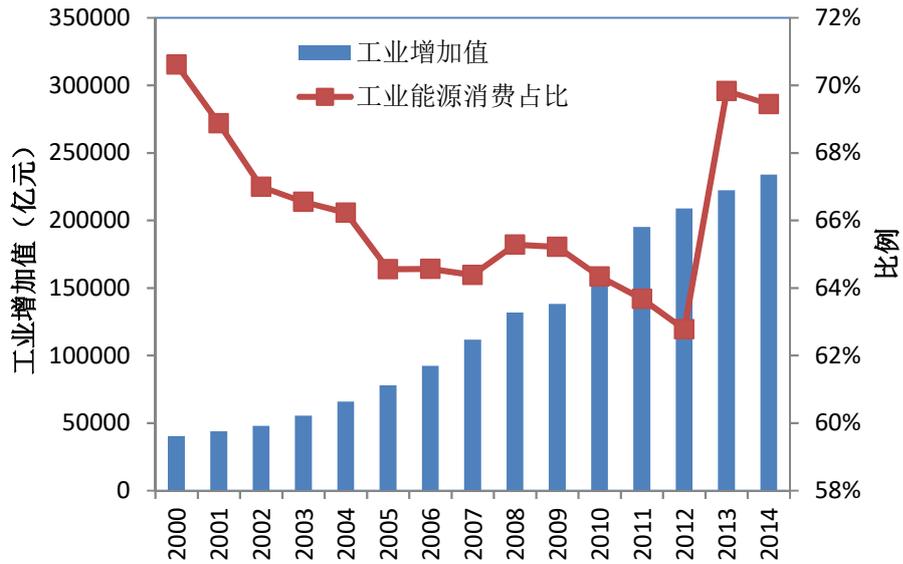
尽管中国的经济总量在持续不断的的增长，但相比其它国家而言，其能源消耗也在不断增长，单位 GDP 能源消耗仍处于较高的位置。表 1-1 对比了全球主要国家和地区的单位 GDP 能源消耗^[4]。从表中可以看出，按汇率法，中国单位 GDP 能耗是 OECD 国家的 4.8 倍，是世界平均水平的 2.6 倍；按购买力法计算，中国单位 GDP 能耗是 OECD 国家的 1.7 倍，是世界平均水平的 1.4 倍。中国 GDP 能耗虽然低于能源丰度较

高的俄罗斯，但与其它 OECD 国家相比，还存在较大的差距。

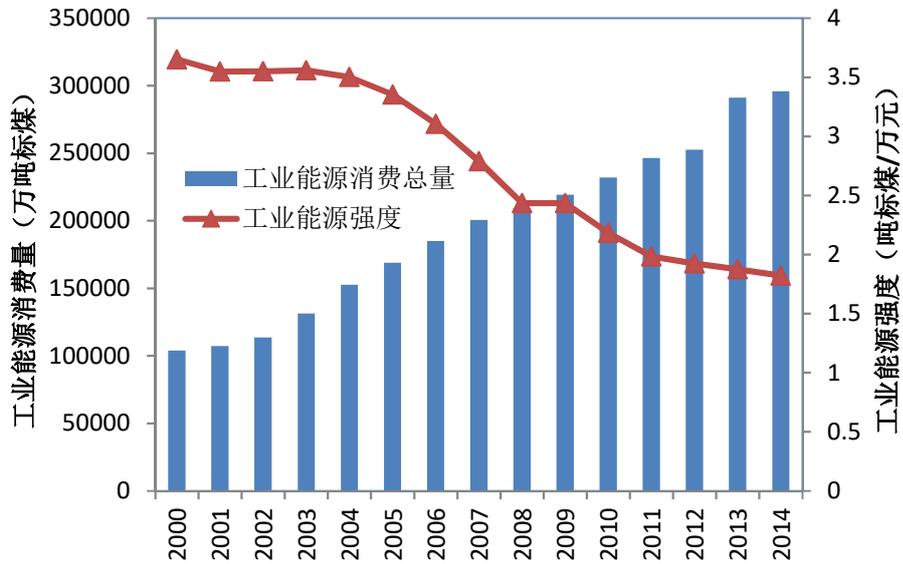
表 1-1 全球主要国家和地区 GDP 能耗对比（2013 年）（以 2005 年不变价计算）

国家和地区	单位 GDP 能耗	单位 GDP 能耗
	（吨石油当量/千美元） （汇率法）	（吨石油当量/千美元） （PPP 法）
中国	0.62	0.22
美国	0.15	0.15
俄罗斯	0.74	0.33
日本	0.10	0.11
韩国	0.22	0.17
英国	0.07	0.09
法国	0.11	0.12
德国	0.10	0.11
意大利	0.09	0.10
澳大利亚	0.14	0.14
OECD 国家	0.13	0.13
全球	0.24	0.16

工业是国民经济的主导，也是能源消耗的大户。从全球来看，2013 年工业领域所消耗的能源占终端能源消耗的 29.1%，其中包括 78.9%的煤、8.4%的石油、37.2%的天然气以及 42.3%的电力^[4]。据 IEA 预测，到 2040 年，工业能源消耗占终端能源消耗的比例将达到 31.4%^[4]。在中国，如图 1-4 所示，工业增加值从 2000 年的 40259.7 亿元增加到 2014 年的 233856.4 亿元，工业能源消耗量从 103773.9 万吨标煤增加到 295686.4 万吨标煤^[1]。换句话说，在过去 15 年间，中国工业增加值年均增长速度保持在 13.4%，而工业能源消耗总量的年均增长速度为 7.8%，低于工业增加值的增长速度。中国工业领域所消耗的能源占总能源消费的比例超过了三分之二。工业能源强度从 2004 年起开始逐步下降，从 2004 年的 3.50 吨标煤/万元降低到 2014 年的 1.82 吨标煤/万元，平均每年降低 4.8%。工业能源强度数值大小反映了工业对能源的依赖程度。该值下降，说明生产单位工业产值的能源消耗降低，也在一定程度上反映出工业能源利用效率的提高。



(a) 工业增加值和工业能源消费占比



(b) 工业能源消费总量和能源强度

图 1-4 中国近几年工业发展趋势

1.2.3 工业污染物排放

能源的使用总会伴随着各类污染物的排放。工业领域的污染物排放主要包括气体类、液体类和固体类。

工业是大气污染的一个重要来源。工业排放到大气中的污染物种类繁多，有烟尘、硫化物、氮氧化物、卤化物、碳化合物等。据《中国环境统计年鉴》可知^[8]，2000年至2014年间，中国工业废气排放总量从138145亿立方米增加到694190亿立方米，

排放量增长超过 4 倍，平均每年增长约 12.2%。以二氧化硫（SO₂）排放为例，如图 1-5 所示，中国工业 SO₂ 在 2000 年的排放量为 1612.5 万吨，占全行业 SO₂ 排放总量的 80.8%，2006 年排放达到最大值，为 2234.8 万吨，随后开始下降，于 2011 年排放达到另一个小高峰后又逐渐降低，2014 年工业 SO₂ 排放量为 1740.4 万吨，占 SO₂ 排放总量的 88.1%。氮氧化物也是工业的主要大气排放物之一。2014 年，全国氮氧化物排放量 2078.0 万吨，其中工业氮氧化物排放量 1404.8 万吨，占全国氮氧化物排放总量的 67.6%^[9]。除此外，2014 年工业粉尘排放量占全国粉尘排放总量的比例也高达 83.6%。

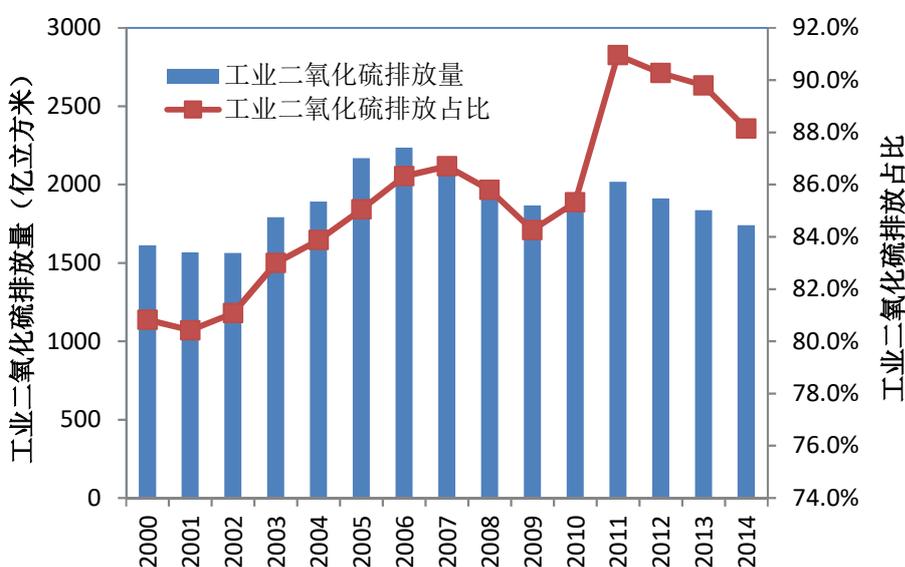


图 1-5 中国近几年工业二氧化硫排放趋势

工业发展也带来了大量的工业废水。据统计^[9]，2014 年，中国废水排放量为 716.2 亿吨，其中工业废水排放量 205.3 亿吨，占废水排放总量的 28.7%。2014 年，全国废水中化学需氧量排放量 2294.6 万吨，比 2013 年减少 2.5%。工业废水中化学需氧量排放量 311.3 万吨，占化学需氧量排放总量的 13.6%。2014 年，全国废水中氨氮排放量 238.5 万吨，其中工业废水氨氮排放量 23.2 万吨，占氨氮排放总量的 9.7%。2014 年，全国工业废水中石油类排放量 1.6 万吨，挥发酚排放量 1362.9 吨，氰化物排放量 165.4 吨。工业废水中重金属汞、镉、六价铬、总铬、铅及砷排放量分别为 0.7 吨、16.9 吨、34.8 吨、131.8 吨、71.8 吨和 109.2 吨。

从工业固废排放情况来看^[9]，2014 年全国一般工业固体废物产生量 32.6 亿吨，综合利用量 20.4 亿吨，贮存量 4.5 亿吨，处置量 8.0 亿吨，倾倒丢弃量 59.4 万吨，工业固废综合利用率为 62.1%。全国工业危险废物产生量 3633.5 万吨，综合利用量

2061.8 万吨，贮存量 690.6 万吨，处置量 929.0 万吨，全国工业危险废物综合利用处置率为 81.2%。

1.3 上海市工业能源现状

1.3.1 工业发展规模

上海市作为一座国际化的大都市，自中国改革开放以来其经济产出规模、产业结构等均发生了显著的变化。据统计数据表明^[61]（图 1-6），上海市生产总值从 1978 年的 272.81 亿元增长到 2015 年的 24964.99 亿元，同期工业生产总值从 207.47 亿元增长到 7109.94 亿元，相应工业生产总值占上海市生产总值的比例从 76.1%降低至 2015 年的 28.5%。从增速来看，上海市生产总值在这期间保持年均 13% 的增长速度，而工业发展则有所放缓，年均增速约为 10%。也就是说，上海的产业结构发生了巨大变化，工业规模持续下降，目前已形成第三产业为主、第二产业为辅、第一产业极少的经济发展模式。

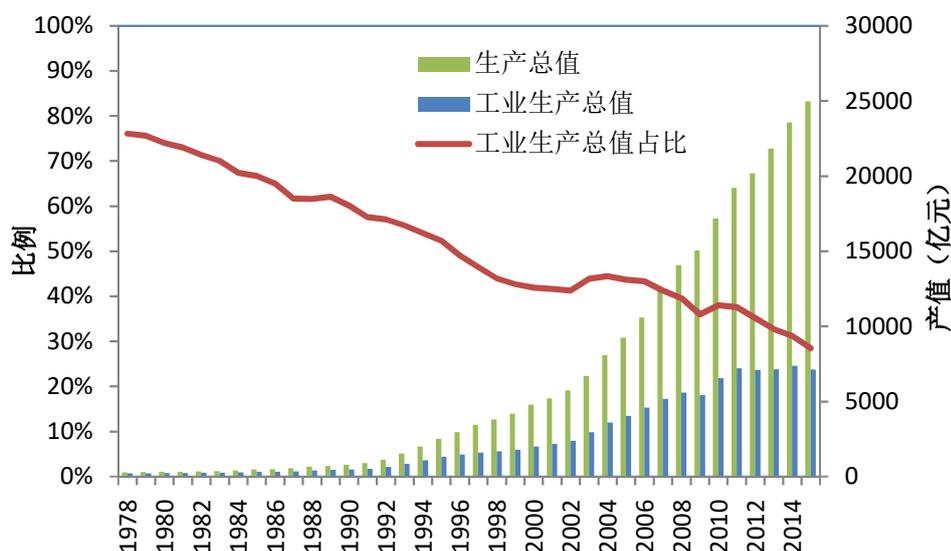


图 1-6 上海市工业生产总值年变化趋势

从工业分行业来看，上海市重点发展的工业行业包括电子信息产品制造业、汽车制造业、石油化工及精细化工制造业、精品钢材制造业、成套设备制造业、生物医药制造业六大类。从占比来看，2015 年这六个重点发展工业行业的工业总产值、工业销售产值、主营业务收入、利润总额占上海市的比重分别是 66.9%、66.8%、67.8%、68.4%^[61]。与 2014 年相比，2015 年这六个重点行业的工业总产值为 20769.44 亿元，下降 0.2%，其中，石油化工及精细化工制造业增长 7.1%，生物医药制造业增长 2.0%，

成套设备制造业增长 0.3%，电子信息产品制造业下降 1.8%，汽车制造业下降 2.3%，精品钢材制造业下降 7.6%。

从上海进出口贸易来看，上海的货物进出口总额在全国所占的比例相对稳定。2015 年上海市货物进出口总额 28060.88 亿元，比上年下降 2.1%。其中，进口 15832.33 亿元，增长 0.5%；出口 12228.55 亿元，下降 5.3%。按贸易方式分，一般贸易出口 5204.19 亿元，下降 3.7%；加工贸易出口 5233.87 亿元，下降 7.4%。按经济类型分，国有企业出口 1577.63 亿元，下降 8.0%；外商投资企业出口 8201.53 亿元，下降 5.7%；私营企业出口 2337.02 亿元，下降 2.4%。2015 年上海市外商直接投资合同金额 589.43 亿美元，比上年增长 86.5%；实际到位金额 184.59 亿美元，增长 1.6%。其中，第二产业合同金额 19.59 亿美元，下降 22.2%；第三产业合同金额 545.00 亿美元，增长 95.7%。可见，上海市的第三产业正在飞速发展。

1.3.2 工业能源消耗

上海市工业发展消耗了大量的能源。从统计数据可知^[61]，上海市能源消费总量从 1990 年的 3191.06 万吨标煤增加到 2014 年的 11084.63 万吨标煤，其中工业能源消费量从 2462.21 万吨标煤增加到 5785.41 万吨标煤。2014 年上海市工业能源消费量占全国工业能源消费总量的比例为 37.5%^[1]。尽管工业能源消费量持续增长，但上海市工业能源消费占全市能源消费总量的比重却在下降，该值从 1990 年的 77.2% 下降到 2014 年的 52.2%。这主要归结于上海市产业结构的调整，工业比重的下降。从能源消耗强度来看，如图 1-7 所示，上海市单位生产总值能耗从 1990 年的 4.082 吨标准煤/万元下降至 2014 年的 0.482 吨标准煤/万元，单位生产总值电耗从 3386.89 千瓦时/万元降低至 595.23 千瓦时/万元，其中工业增加值能耗则从 5.241 吨标准煤/万元降低至 0.725 吨标准煤/万元，工业增加值电耗从 4703.19 千瓦时/万元降低至 984.30 千瓦时/万元。

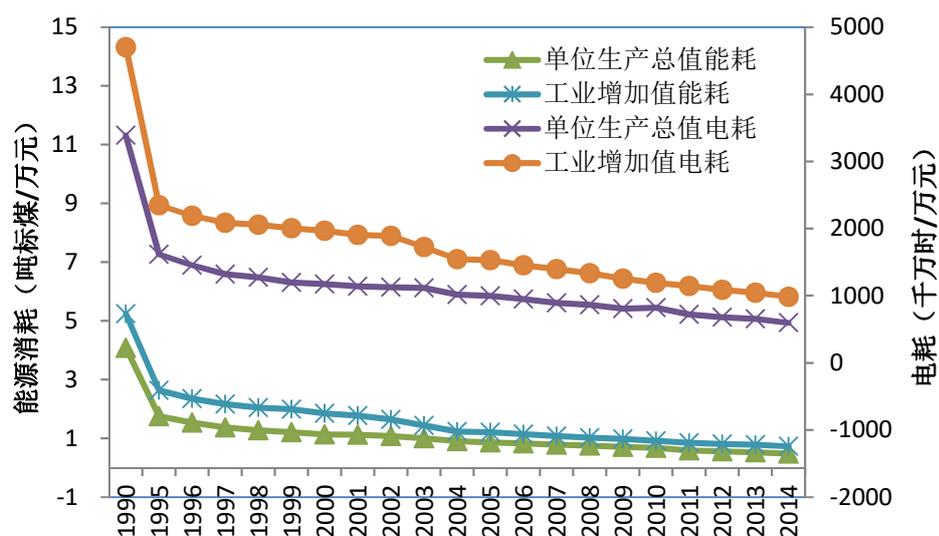


图 1-7 上海市能源消费基本情况

从工业能源消费结构来看，2014 年上海市工业行业主要消费的能源品种有原煤、焦炭、燃料油、汽油、煤油、柴油、其他石油制品、热力、以及电力，数量分别为 862.92 万吨、654.84 万吨、21.22 万吨、29.56 万吨、0.75 万吨、61.70 万吨、254.43 万吨、10045.08 万百万千焦、710.70 亿千瓦时^[61]。其中，工业用原煤、焦炭、燃料油、汽油、煤油、柴油以及电力占全国各类工业能源消费总量的比例分别为 0.2%、1.4%、0.7%、6.0%、4.3%、3.9%和 1.7%。其中原煤、焦炭、燃料油、电力是主要的四种能源。如图 1-8 所示，原煤和焦炭所占的比例最大，并在过去的三十年中一直保持稳定的趋势，而燃料油消费的比例较低，且该比例仍在逐年减少，工业用电的需求在逐步增大，但总体比例仍偏低。

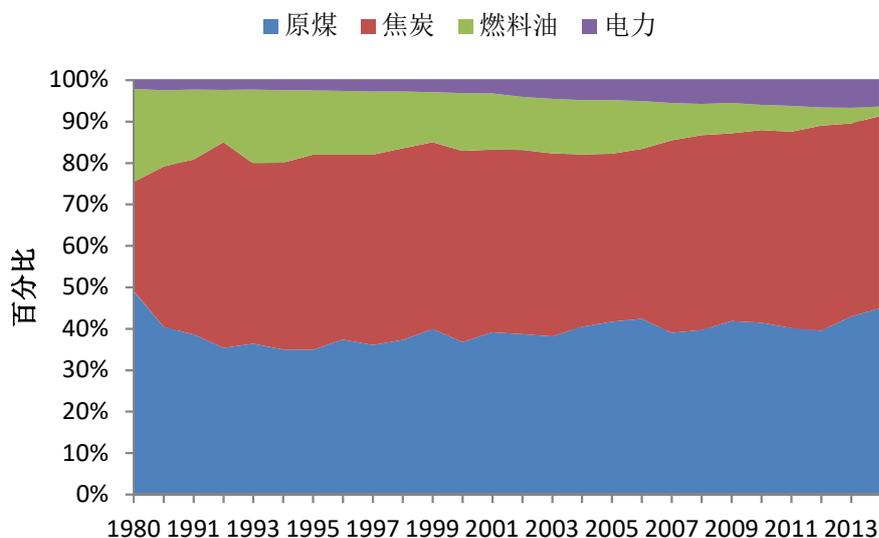


图 1-8 上海市工业能源消费结构变化趋势

1.3.3 工业污染物排放

工业发展也带来显著的环境问题。表 1-2 列举出了上海市在过去二十年间的工业废气和废水排放^[61]。

表 1-2 上海市工业污染物年排放情况

年份	工业废气			工业废水	
	废气排放总量 (亿标立方米)	烟尘排放总量 (万吨)	废气 SO ₂ 排放总量 (万吨)	废水排放总量 (亿吨)	废水中 COD 排放总量 (万吨)
1995	4625	13.33	38.15	11.61	12.29
1996	4757	14.77	43.30	11.41	12.16
1997	4755	13.38	43.62	9.99	11.70
1998	4912	10.74	39.09	9.00	9.63
1999	4947	9.00	31.09	8.52	8.92
2000	5755	8.32	32.68	7.25	6.93
2001	6964	6.23	30.00	6.80	5.27
2002	7440	5.60	32.49	6.49	4.78
2003	7799	4.97	30.07	6.11	4.38
2004	8834	5.25	34.95	5.64	3.76
2005	8482	4.95	37.52	5.11	3.66
2006	9428	4.73	37.43	4.83	3.53
2007	9591	4.04	36.44	4.76	3.38
2008	10436	4.06	29.80	4.41	2.76
2009	10059	3.64	23.93	4.12	2.90
2010	12969	4.18	26.32	3.67	2.16
2011	13692	6.64	21.01	4.46	2.74
2012	13361	6.37	19.34	4.77	2.62
2013	13344	6.72	17.29	4.54	2.55
2014	13007	13.14	15.54	4.39	2.48

可见，上海市工业废气排放总量持续增长，最近几年略有回落。1995 年工业废气排放总量为 4625 亿标立方米，2011 年达到峰值 13692 亿标立方米，2014 年减少到

13007 亿标立方米。工业烟尘排放量波动较大,1995 年工业烟尘排放量为 13.33 万吨,1996 年起工业烟尘排放量开始下降,到 2009 年达到最低值 3.64 万吨,随后又逐年增长,2014 年又突增到 13.14 万吨。废气中 SO₂ 的排放量得到有效控制,在 2005 年 SO₂ 排放达到峰值 37.52 万吨后开始降低,2014 年降至 15.54 万吨。工业废水排放总量也呈现逐步下降趋势,2010 年工业废水降至最低值 3.67 亿吨,随后废水排放略回升至 2014 年的 4.39 亿吨。值得注意的是,废水中化学需氧量(COD)的排放量逐年下降,2014 年降低至 2.48 万吨。

从固体废弃物排放来看,工业固体废弃物产生量从 2000 年的 1354.74 万吨增加到 2014 年的 1924.79 万吨,工业废弃物综合利用量相应地从 1515.90 万吨增加到 1876.86 万吨,工业废弃物综合利用率则从 93.26%提高到 97.51%。从空气质量来看,2015 年上海综合空气质量指数 5.32,PM_{2.5} 平均浓度为 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,接近全国的平均值 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[7]。上海也是中国酸雨的主要分布地区之一。2000 年、2010 年、2013 年、2014 年的酸雨频率分别为 26.0%、73.9%、75.1%、72.4%,各年降水的 pH 值分别为 5.19、4.66、4.81、4.90。

1.4 能源生产力研究现状

1.4.1 能源生产力概念

传统的政治学中,生产力指的是“人们征服自然、改造自然的能力”。王万树等人^[10]将这一概念抽象成“人们支配自然、认识自然、征服自然,使自然物质资源形成社会物质产品,形成社会使用价值的能力”。从概念上来看,构成生产力的因素包括了劳动力、资本、科学技术和自然资源等。经济学中生产力指的是单位投入所能创造的产出价值^[11]。例如,劳动生产力是通过单个工人创造的产出或单位时间劳动力的产出来衡量,资源生产力是指单位资源投入所创造的经济产出。以此类推,能源生产力的定义是指某一给定能源投入所创造的产品和服务(或福利)的数量和质量。

长期以来,能源效率是用来衡量能源利用有效程度的一个主要指标。尽管各界对于能源在社会经济中的重要性已达成共识,并意识到能源效率在减少能源消费及环境污染、保证经济稳定增长方面的重要作用,但对于能源效率的定义在较长一段时期内仍未达成统一的认识。由于侧重点不同,不同研究领域的能源效率概念有着不同的内涵。如能源生产率、能源经济效率^[12]、能源技术效率、能源强度,以及最近几年涌现

的能源生产力。

1995 年世界能源委员会对能源效率的定义为减少提供同等能源服务的能源投入。也就是说，能源效率强调的是“少用”。能源效率可分为单要素能源效率和全/多要素能源效率。全要素能源效率来源于经济学中的全要素生产率理论，将能源与资本及劳动相并列，作为一种生产要素进行考虑。全要素能源效率的定义及测算依赖于建立的投入—产出指标体系及生产前沿面的确定方法。尽管单要素能源效率定义形式简洁具体，便于不同对象间的比较，但就科学性来讲其不及全要素能源效率。虽然全要素能源效率弥补了单要素能源效率的种种不足，更具科学性，但在实际使用当中并未完全代替单要素能源效率。其主要原因在于对于全要素能源效率的评价标准的认识各界存在差异。这种差异体现在三方面：一是全要素能源效率的投入产出指标体系的构成学者们有不同观点；二是相应指标的处理及数据口径存在差异；三是具体测算方法不同。

能源强度是能源利用与经济或物力产出之比。在国家层面，能源强度是国内一次能源使用总量或最终能源使用与国内生产总值之比。能源强度是用于对比不同国家和地区能源综合利用效率的最常用指标之一，体现了能源利用的经济效益，反映了经济对能源的依赖程度。但在应用能源强度概念时，仅仅是能源使用量与与经济或物力投入的简单且单一的比对，并且能源强度的时间趋势是无限趋近于某个“最低值”，无法看到更多的积极影响。

能源生产力的意义在于用同样或更少的能源来获得更多的产出。即是能源生产力强调的是“如何多产”。对某一公司而言，能源生产力可用总收入与总能耗之间的比值来衡量。值越高，表明该公司的能源生产力越大。良好的能源生产力可以节约成本、减少浪费、降低污染。对一个国家而言，能源生产力是该国所有商品和服务的总价值（例如，GDP）与生产这些商品和服务所消耗的能源的比值。同样，该值越大，说明该国具有越好的能源生产力。美国节能联盟（Alliance to Save Energy）^[13]把能源生产力看作经济产出和能源消耗的比值，也是能源强度的倒数。提高能源生产力有诸多益处：1）减少能源消耗；2）减少温室气体（Greenhouse gases, GHG）排放；3）提高公司竞争力，增加收益；4）增加产出；5）提高可再生能源的利用比例；6）减少排放；7）保障能源安全；8）提供能源价格或税收弹性等。

就定义式而言，能源生产力与能源效率相同，但是其含义与能效有很大差别。能

源效率旨在通过消耗更少的能源获得当前相同数量的产出，即采用节能技术，消耗更少的电能、天然气或其他能源，而产量却和采用节能技术前相同。提高能源效率可以直接减少完成既定任务所需的能耗数量，相反，能源生产力关注的却是从消耗的每份能源中获得最大化的经济利益。能源生产力概念将决策者的目光从节能上移开，转向更好地利用能源提高社会福利^[31]。能源生产力指标，相较于能源效率，有以下优势^[32]：第一，含义中融入经济增长，提供了一个新的视角即扩大社会福利，比如增加就业；第二，可被用来测量国家和地区层面的能源效率，因此可被用来衡量具体的政策措施是否达到预期效果；第三，过去 20 年的气候谈判表明，“碳约束”和“增长约束”争论难以达成共识，而能源生产力指标在这些争论的缺口上架起一道桥梁。综上，本报告将采用能源生产力指标评价中国工业领域的能源经济系统。

1.4.2 能源生产力国际比较

伴随着人类社会的发展，能源生产力也随着经济发展水平的提高而提高。根据世界银行统计数据可知^[14]，按照 2011 年不变价计量，全球的能源生产力从 1990 年的 5.51 美元/千克石油当量增加到 2013 年的 7.63 美元/千克石油当量，增长超过了 4 倍。前述表 1-1 的数据可知，无论是用汇率法还是 PPP 法，我国的能源强度都与发达国家存在较大的差异，甚至低于世界平均水平。图 1-6 中能源生产力的结果再次印证了这一观点。1990 年，中国的能源生产力水平仅为 1.98 美元/千克石油当量，远低于其它发达国家，同期美国、英国、法国、德国、日本、澳大利亚、韩国的能源生产力水平分别为 4.83、7.40、7.69、7.12、8.31、5.64、5.58 美元/千克石油当量，意大利的能源生产力甚至高达 11.89 美元/千克石油当量。到 2000 年，中国经济取得飞速发展，能源生产力陡增到 4.00 美元/千克石油当量，超过俄罗斯，缩小了与美国等的差距。近十年来中，各国的能源生产力均保持一定的增长。英国、德国的增长速度较快，这主要是可能与该国的能源消耗量下降有一定的关系。尽管中国的能源生产力也有所增长，2013 年该值为 5.30 美元/千克石油当量，但同期意大利的能源生产力值高达 13.86 美元/千克石油当量，德国的值为 11.62 美元/千克石油当量，法国为 10.18 美元/千克石油当量，日本为 10.26 美元/千克石油当量，美国为 7.48 美元/千克石油当量。不难发现，相比其他国家，中国仍是依靠高投入来维持经济的增长。

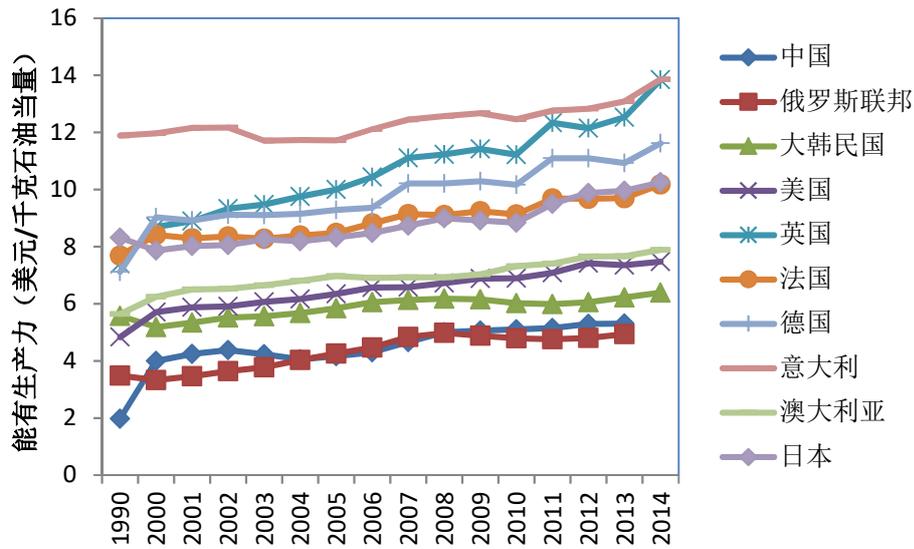


图 1-9 主要国家能源生产力发展趋势

1.4.3 主要国家能源生产力发展

中国近十年来一直在努力提高能源生产力，但仍落后于世界上很多其他国家。为此，我们需要了解这些情况，并对做得最好的国家进行比较，为国内的能效事业提供更多背景。

以美国为例，2013 年，美国政府提出了要到 2030 年将美国能源生产力在 2011 年基础上翻一番的目标^[15]。多年来，美国联邦以及许多州和地方政府都采取了一系列公共措施以提高能源效率和生产率。其中的基本原理和政策手段随着时间和地点变化而不同，但也有一些共同之举，包括利用政府政策降低能源成本和成本波动、避免或延缓对成本较高的能源供应方案进行投资、提高能源安全性和可靠性、减少能源生产和运输对生态环境的影响、以及保证地区部分支出涉及能源相关的项目等^[13]。

日本每年消耗约 20 万亿英热单位(Btu)的能源，2015 年一次能源消耗 448.5Mtoe，为全球第五大能源消费国^[3]。但日本在能效的推动方面遥遥领先。日本不仅是世界上单位 GDP 能耗最低的国家之一，也是世界上唯一实施了国际能源署 (IEA) 所有二十五条能源效率政策建议的国家。1947 年日本实施了第一个节能政策，并于 20 世纪 70 年代对其进行了修订，此后，日本工业部门能耗增幅处于最低。继 1979 年能源危机之后，日本又出台了相关节能法案，并成立了日本节能中心 (ECCJ)。ECCJ 发起了多个倡议，包括领跑者计划 (Top Runner Program)，该计划使得日本空调能效从 1995 年到 2005 年间增加了 40%。近期，日本又制定了新的能源生产力目标，即是到

2030 年将总能源消耗相比 2003 年降低 30%。

德国制定了《国家能效行动方案》(2008-2016)，其能源强度目标是“在 2007 年到 2016 年间将能效提高 9%”，以及“到 2020 年，每单位 GDP 的一次能源消耗量减少 20%；到 2050 年减少 50%。”德国的能效措施针对很多不同的行业领域，但重点在住宅部门。

澳大利亚也于 2015 年 4 月发布了能源白皮书，旨在提高该国的能源生产力。ClimateWork 的最新报告指出，通过投资改善整体能源系统以及依靠科技进步澳大利亚具有到 2030 年使能源生产力翻一番的潜力。

巴西国家能源效率行动计划的目标是：电力消耗在 2030 年前降低 10%。2011 年 10 月，矿业和能源部批准了能源效率国家计划《房地和基本方针》，其中列出了为实现其节能目标的行动大纲。巴西财政部估计，在 2008 至 2017 年间，在扩大该国的国家能源输出方面的投资将超过 3500 亿美元。

加拿大于 2008 年提出“各省决心通过改进建筑标准、产品管制准则、绿色建筑政策、审计以及改造援助，将其 2020 年前的能效提高 20%”的目标。

丹麦的目标是到 2050 年实现化石燃料独立，在 2020 年前减少 11% 的总能源消耗量（与 2006 年相比），并希望到 2020 年，成为按照能源强度计算，全球最节能的三个国家之一。

根据欧盟（EU）指示，法国正努力使其 2008 至 2016 年间的能耗降低 9%，到 2020 年将能耗降低 20%。法国政府还计划到 2015 年，将年均能源强度降低 2%；到 2030 年将其降低 2.5%，重点在交通运输以及建筑领域。

印度于 2002 年颁布了《节能法》，并创建了能源效率局以执行该法案。印度的目标是在 2015 年前将能耗降低 5%。

墨西哥的目标是到 2012 年节能 2%，到 2030 年节能 30%。该国计划到 2012 年，节省 43416 GWh 电量。墨西哥的国家能源战略指出，到 2024 年，35% 的电力都应来自于清洁技术；中期目标是到 2012 年，7.6% 的电力来自于可再生能源。

按照欧盟指令，瑞典国家能源效率计划是到 2016 年（以 2001 至 2005 年为基准）将能耗降低 9%（或将终端能源节省 41 TWh），长期目标是到 2020 年将能效提高 20%，在 2008 至 2020 年间，不同部门的能源强度降低 20%。

英国的计划是到 2016 年，节约 9% 的能源。但它希望通过重要的政策和措施，到

2016 年使实际节省额达到 18%。

1.5 本报告工作简介

1.5.1 研究意义

资源消耗、环境污染和经济增长是目前全世界都在关心的热点问题，作为经济发展速度最快的发展中国家，中国工业一直以来的粗放式发展所带来的能源耗竭和污染问题尤为严重。从地域发展来看，中国各地区之间的发展水平极不均衡，东部沿海由于改革开放等原因发展相对较快，而中国西部地区相对落后。并且，国内各地区的发展阶段也不尽相同，“十二五”期间，中国从工业化中期进入到工业化后期阶段，而上海、北京等地在“十一五”期间就已经全面进入工业化后期阶段。

中国这种传统的以经济增长为主要目的、以牺牲生态环境为代价、高投入高产出的粗放型发展模式已经不适应中国发展的国情，经济发展方式亟需转变。国际上，2015 年的巴黎气候大会呼吁世界各国关注全球气候变暖的问题，中国作为负责任的大国在提交给大会的国家自主贡献文件中承担了巨大的减排任务；在国内，中国面临着“三期叠加”带来的经济下行压力，急需调整、优化产业结构，淘汰落后产能，寻找经济增长新动力，提高能源生产力。

从国外能源生产力的发展来看，提高能源生产力不仅可以减少投入，还能能源最大化产出。因此，对中国工业领域的能有生产力发展进行评估有着重要的现实意义。一方面可以认清各生产要素对能源生产力的影响，以便调整、优化产业结构，还可以获得各省市的相对生产效率，位于生产前沿面上的省市无疑是其它省市的学习榜样。

目前以城市的各个行业为对象研究其能源生产力影响因素的工作较少。上海市虽然是中国的经济中心，但与发达国家的经济中心城市相比，其工业化水平仍然有一定的差距。在国际经济复苏缓慢和国内“三期叠加”经济下行的背景下，上海市仍需继续优化升级产业结构，进一步提高能源生产力，向着更好的方向发展的同时也为中国其它相对落后的省市指明发展方向。上海市“十三五”规划指出，“十三五”是上海产业结构改革、升级的关键期。对上海工业领域能源生产力影响因素的研究，可为政府制定政策和企业的人事调整、投资、生产技术更新等方面提供重要的参考价值。

1.5.2 研究内容

大量相关研究，特别是围绕中国能耗强度与中国能源效率问题而展开的分析与探讨，为我国节能路径的选择及经济的可持续增长提供了细致、综合而全面的证据。本报告正是在这些研究的基础上，通过比较、判断、总结与归纳，提炼出了本报告的研究思路与内容。报告首先立足于能源生产力的计算原则，建立基于全要素的能源生产力评价方法，并以中国工业领域和上海工业领域为研究案例，来验证能源生产力评价的合理性。全要素能源生产力理论考察的因素包括投入因素，如资本、劳动力、能源投入等，产出因素包括经济产出、以及非期望产出 CO₂ 等。通过对以往研究方法的筛选，本报告对比了用参数法 SFA 和非参数法 DEA 评价能源生产力及其影响因素的异同，并在此基础上选取了合适的方法用于对上海市某一工业园区进行典型性分析。为得到上海市工业领域与 CO₂ 减排的关系，报告还通过建立模型分别对上海市 2020 年和 2030 年的工业能源生产力进行预测，并推出在这个能源生产力的目标下上海市工业各行业承担的减排任务，从而为相关政策制定提供建议。具体的研究思路见图 1-10。

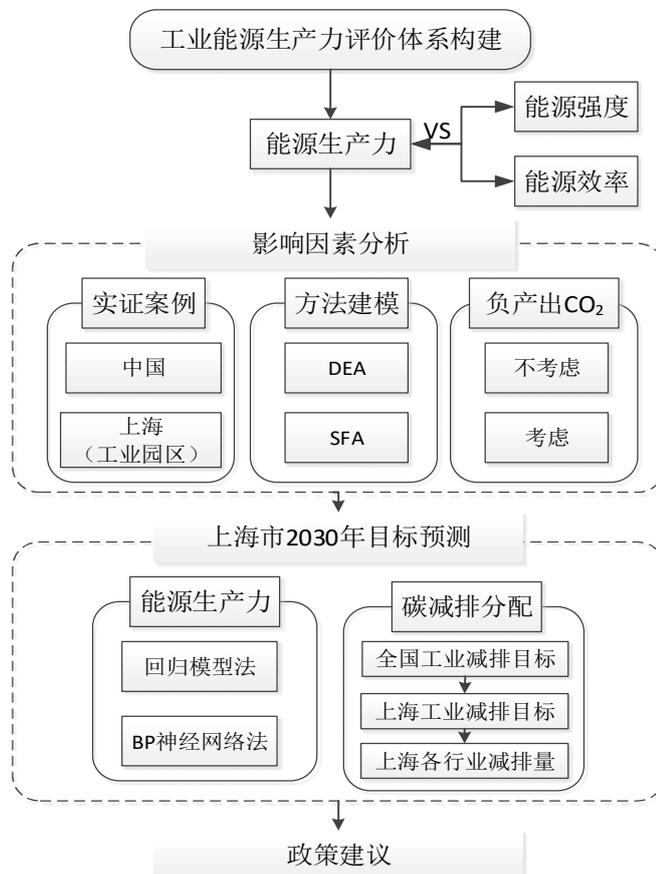


图 1-10 本报告研究思路

具体的内容安排如下：

第一章为绪论。主要包括研究背景介绍、中国工业能源消耗现状、能源生产力指标研究现状，并在此基础上提出了本报告的研究意义和内容。

第二章在综述研究方法的基础上提出本研究的具体方法。该章中包含了数据包络分析方法和随机前沿法的相关国内外研究进展，详细介绍了计算能源生产力及其影响因素分解的具体数学方法。

第三章为基于数据包络法的全国各省市和上海市工业领域能源生产力评估的实证研究。主要介绍不同方法和条件假设下的能源生产力比较，并在探讨了不同假设下影响全国各省市工业能源生产力的因素。

第四章为基于随机前沿法的全国各省市和上海市工业领域能源生产力的实证研究。主要介探讨了随机前沿的情景下能源生产力的计算模型和影响全国各省市工业能源生产力的因素。本章最后还将对比随机前沿和数据包络两种方法的结果，最终选取最合适的方法对上海市某一工业园区的能源生产力进行典型性分析。

第五章是对上海市 2030 年的工业能源生产力及碳排放进行预测，并通过预测给出上海市工业各行业应承担的具体的碳减排量。

第六章为总结与政策建议。在全文研究结论的基础上，结合中国的实际情况，提出中国以及上海市工业发展的相关政策建议。

第二章 研究方法与文献综述

2.1 相关文献综述

2.1.1 能源生产力研究方法

传统能源过度消耗导致的环境问题日益突出,而能源又是经济发展不可缺少的投入要素之一,世界各国在发展经济的同时不得不处理好能源消耗与环节排放的问题。提高能源效率几乎是公认的一种促进经济增长、加强能源安全、降低温室气体排放的方法。然而,能源效率这种减少能源消耗为目的的手段在某种程度上被认为是失败的,因为经济增长的同时几乎都伴随着不断上升的能源需求。因此,用能源生产力来衡量行业发展更能反应实际的经济增长目标^[16]。目前,美国、德国、澳大利亚等国已经将能源生产力作为国家的衡量指标,并提出了各自的发展目标。若达到美国提出的到2030年使能源生产力翻番的目标,美国将会减少18%的总能源需求(2011年水平),降低33%的CO₂排放,将能源净进口率降低至7%^[17]。

在探讨能源生产力的影响因素时,许多研究者也借鉴分解能源效率的经验。因为对某一实际生产过程而言,它是一个多投入、多产出并且伴随着非期望产出的过程,其生产效益受到各个投入、产出、非期望产出以及当下的自然、社会环境的影响,是一个影响因素众多、因素之间关系复杂的过程,因此很多学者把生产活动从投入要素到产出要素之间的转变过程称作“黑匣子”。数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)和随机前沿面分析(Stochastic Frontier Analysis, SFA)是目前被国内外学者广泛使用的两种分析效率的方法。它们也被作为分析全要素能源生产力的理论基础。

SFA是参数法估算效率的代表,通过已有数据确定自变量和因变量之间的函数关系式,从而估算企业效率,SFA还具有反映统计数据误差的功能^[18, 19];DEA是非参数法估算效率的代表,DEA通过面板数据确定生产前沿面,位于前沿面上的决策单元被认为是技术有效的,相应的位于前沿面内的决策单元被认为是技术无效的,技术无效的决策单元的实际生产效率低于理想生产效率。与SFA相比,DEA的缺点在于通过面板数据构建的生产前沿面是非随机的,被测量单位到前面与前沿面的之间的偏差唯一的解释就是技术无效率,无法反映数据本身在测量过程中出现的误差等统计误

差的影响^[20]；但另一方面，DEA 作为非参数的效率评估方法，不需要建立自变量和因变量之前的函数关系式。此外，DEA 对多投入和多产出、包括附带非期望产出的生产模型的适用性非常强，而多投入和多产出是生产活动普遍存在的显著特性。因此与 SFA 相比，DEA 可以避免因为函数形式选用错误而导致结论错误的风险，更适合处理多投入、多产出的生产决策单元^[18, 21]。显然多投入、多产出的比单投入、单产出的生产模型更接近实际，目前国内在评价能源生产力或者能源效率中使用比较广泛的是 DEA 模型^[22, 23]。可以看出，SFA 和 DEA 各有其优缺点，本报告将分别用这两种方法对工业能源生产力进行评价。

2.1.2 DEA 方法国内外工作综述

DEA 是由美国著名运筹学家 A.Charnes 和 W.W.Copper 等学者以“相对效率”概念为基础，根据多指标投入和多指标产出对相同类型的单位进行相对有效性或效益评价的一种新的系统分析方法。自从 1978 年提出第一个 DEA 模型以来，DEA 方法不断得到完善并在实际中被广泛运用，已被广泛应用于不同行业及部门。

Newman 等^[24]采用基于产出的非径向距离函数研究了 1984~2000 年间爱尔兰牛奶厂的生产力增长情况。研究采用了全要素生产力系数，并把其改变分解为技术改变、效率改变和规模效率改变三个影响因素。结果表明爱尔兰的牛奶场在研究的时间段内生产力每年的增长率为 1.2%。Chambers 等^[25]在生产集合理论的基础上提出了一种方向性的径向距离函数，并且证明了这种方向性的径向距离函数是现有的其它距离函数（如投入和产出距离函数，McFadden 测量函数，以及方向性投入距离函数）的广义形式。Wang 等^[26]在生产理论中使用 Shephard 产出距离函数，将能源生产力改变分解为三个影响因素：潜在最大能源生产力改变，技术效率改变，以及技术改变。然后假设参考的生产技术是规模收益不变的，进一步把潜在最大能源生产力改变分解为资本-能源比改变、劳动力-能源比改变、能源投入改变和产出结构改变四个影响因素。以经济合作与发展组织的 23 个成员国在 1980 和 1990 这两两年间的能源生产力为研究对象，发现能源生产力提高的重要动力来源是技术进步，能源投入、资本-能源比、劳动力-能源比对能源生产力都有影响，资本-能源比和电力-能源总量比的增加有助于能源生产力的提高，劳动力-能源比在这段时间的减小导致其对能源生产力提高起负面作用。

Menegaki 等^[27]用 DEA 方法计算了欧洲一些国家的全要素生产力,并用 Malmquist 指数对该结果进行了分解。结果可知该地区的平均总效率为 0.892, 平均纯技术效率为 0.569, 规模效率为 1.798。可再生能源的利用比例越高, 效率越低。

Atallah 等^[28]用三种方法比较了 39 个国家在 1995~2009 年间的能源生产力变化驱动因素, 结果表明: 国家层面能源生产力提高的主要驱动力因产品效率提高而引起的各部门能源生产力提高; 经济结果从工业向服务员的转变并没有明显促进综合能源生产力的提高; 经济结构从工业向服务业的转变对提高综合能源生产力的作用不明显; 人口和经济规模相同, 这些国家也具有相似的能源生产力的提高率。

Hu 等人^[29]在研究澳大利亚建筑行业过去二十年的能源消耗时, 采用 Malmquist 指数来考察影响该行业的能源生产力, 并将其与全要素生产率分解得来的结果进行比较。该文还采用了面向投入的距离函数和同期基准技术来编写 DEA 模型。Malmquist 生产率指数被分解成技术进步、纯技术效率变化等。结果表明, 澳大利亚建筑业的能源生产力和全要素生产率的提高均与技术发展有关。纯技术效率和活动指数均随时间的推移、地区的改变而改变。能源生产力和全要素生产率之间通过技术和技术效率而存在一定的联系。通过引入先进技术并有效利用可提高澳大利亚建筑业的能源生产力和全要素生产率。

Zhang 等^[30]用共同前沿非径向距离函数来模拟发电厂的全要素能源效率和 CO₂ 排放, 同时还考虑了群体异质性和非径向松弛。对韩国发电厂的实证分析结果表明, 煤电厂相比燃料油电厂表现出较高的全要素能源效率和 CO₂ 排放特性。在共同前沿技术假设下, 煤电厂的技术缺口比燃料油电厂小。说明韩国政府需要通过技术创新缩小燃料油发电的技术缺口, 如此才能全面提高能效和 CO₂ 排放性能, 从而达到韩国政府提出的减排目标。

Ang 等^[31]把传统的两要素的 Fisher 系数分解法推广到了 n 个要素, 从而形成一种适用于多个要素的广义 Fisher 系数分解法。文章还以在韩国经济中的 CO₂ 排放量改变影响因素分解为例, 运用经过推广的 Fisher 系数分解法把 CO₂ 排放量的改变分解为 4 个影响因素并分别求出各个影响因素的值。这种广义 Fisher 系数分解法后来被 Chunhua Wang 等用在能源生产力的研究中。

在碳排放方面, Zhou 等^[32]首次提出全要素 CO₂ 排放的概念, 通过求解 DEA 模型得到了 Malmquist CO₂ 排放指数, 并利用息票剥离法对该指数进行数据处理。对全球

18 个 CO₂ 排放大国的实证分析结果表明, 这些国家 1997~2004 年间的 Malmquist CO₂ 排放指数整体上提高了 24%。He^[33]提出了基于松弛变量测量 (slacks-based measure, SBM) 的 DEA 方法来评价 G20 国家的低碳管理特性, 结果表明, 欧洲、北美的一些发达国家和日本在享有高经济发展水平的同时, 还具有优良的低碳管理特性, 而中国在这方面与之还相差甚远。Wang 等^[34]对比研究了中国和美国两个国家的产出增长和 CO₂ 排放, 通过广义 Fisher 系数分解法把 CO₂ 排放量改变分解为四个影响因素。研究发现两个国家的碳排放增加的主要原因都是产出增长, 并且碳减排的主要贡献来源都是能源密度的减小。Wang 等^[35]基于共同前沿非径向距离函数提出三步法测量全球 54 个国家的全要素 CO₂ 排放特性。第一步是在组前沿面上计算 CO₂ 排放特性, 第二步是根据这些结果计算技术缺口比, 第三步是在共同前沿面上用前两步的数据计算 CO₂ 排放特性。结果表明, 中上游收入国家与高收入和低收入国家不一样, 高收入国家享有优越的生产技术, 而低收入国家技术水平低, 管理低效和技术缺口对 CO₂ 排放特性具有坏的影响。Zhang 等^[36]提出共同前沿非径向 Malmquist CO₂ 排放指数来考察全要素 CO₂ 随着时间的动态变化。共同前沿非径向 Malmquist CO₂ 排放指数是在 Malmquist CO₂ 排放指数的基础上考虑了非均匀度和非径向松弛。对中国 2005~2010 年间火电厂的 CO₂ 排放实证分析结果可知, 全要素 CO₂ 排放增长 0.38%, Malmquist CO₂ 排放指数呈 U 型增长趋势。Wang 等^[37]基于生产理论用径向距离函数和随机前沿 (SFA) 相结合的方法提出了新的全要素 CO₂ 排放指标。对中国各省区的实证分析结果表明, 东南沿海地区的 CO₂ 排放高, 中西部内陆地区的低, 有关减排的政策不是以牺牲能效为代价的。

国内有学者进行了很多 DEA 相关方面的工作研究, 不仅包括对中国整体能源效率的评估, 还包括各种工业^[38]、交通运输^[39, 40]、建筑^[41]、农业^[42]等行业。孙广生等^[43]用产出距离函数对传统能源效率进行分解, 考察了 1986~2010 年间中国各地区能源效率影响因素, 得到如下结论: 能源效率变化的主要影响因素按贡献大小的排列分别是技术进步、投入替代变化与效率改善; 能源效率的地区结构差异表现出一定的地带性。Hu 等^[44]引入全要素能源效率概念, 并对比了中国 1995~2002 年间不同地区的全要素能源效率, 发现相比传统能源效率, 全要素能源效率更能反映实际情况。史云鹏^[45]基于系统论的观点将环境污染及人力资本因素引入全要素能源效率框架, 构建了全要素能源效率指标体系。Wang 等人^[46]基于尤伯格 (Luenberger) 生产率指标和 DEA

方法，提出了一个结合能源投入的综合能源生产率指标。此外，该文还将这些指标进一步分解成四个影响因素：纯效率变化、规模效率变化、纯技术变化和技术规模变化。其对中国 1997~2012 年间的能源生产率变化实证分析结果表明：若忽略能源消耗结果，中国的能源生产率增长可能被高估了；从能源种类对能源生产力的增长贡献来看，石油和电力是正的贡献，煤和天然气是负的贡献；能源生产力变化是由技术进步引起的，而非效率变化；波特假说对中国碳排放控制法规可导致能源生产力增长这一说法部分支持。Chen 等^[47]的研究表明：（1）能源生产力对中国地方官员的政策驱动有显著作用，这意味着地方官员有提高能源生产力的动力；（2）能源生产力对地方官员的政策驱动的影响是随着经济增长方式和地方官员晋升机制调整而改变的。

在原有方法的基础上^[26]，Wang 考察了中国省级能源生产力增长的因素，结果表明^[48]：资本-能源比、产出结构以及技术进步对中国能源生产力增长有贡献；由资本累积引起的资本-能源比增加是能源生产力增长的主要驱动力。Chang 等^[49]在全要素能源效率和 Luenberger 生产指数的基础上引入全要素生产力变化指数，并用来评估中国各地区的能源生产力变化。全要素生产力变化指数被进一步分解为能源效率变化和能耗技术转入。计算结果得知：中国 2000~2004 年间能源生产力下降 1.4%，平均全要素能源效率年均增长 0.6%，全要素能源技术变化年均下降 2%。Wang 等^[50]在 DEA 分析中纳入了期望产出和非期望产出，将投入区分为能源投入和非能源投入，还应用 DEA 视窗方法对中国 29 个省区于 2000~2008 年间的能源和环境效率进行评估，实证分析结果表明，中国东部地区具有最高的能源和环境效率，西部最低。Wang 等^[51]还对比了两种不同的非期望产出处理方法，结果表明，非期望产出转化的处理方式因其具有更突出的辨别能力从而更适合中国各地区能耗与排放评价特征。为避免地区间数据因而交互而引起的偏差，Yao 等^[52]在用共同前沿面非径向距离函数评估中国各地区能源效率和碳排放时，纳入了区域异质性，结果表明：各地间能源效率、碳排放特征具有明显的群体异质性；由于能源投入和其它投入之间的替代有限，全要素和单要素指标之间不存在显著差异；效率低排放高的地区具有交大的碳减排潜力。

在工业领域方面，一些学者也进行了相关研究。Yang 等人^[53]用 DEA 方法考察了中国实施节能减排政策以来，对比了 15 个制造业在“十五”和“十一五”期间环境调整能源生产力的变化情况。结果表明，所考察的 15 个行业中，仅黑色金属冶炼及延压加工业、非金属矿物产品制造业、通讯设备、计算机和其它电子设备制造业、

以及有色金属冶炼及延压加工业这 4 个行业因节能减排政策的实施而使能源生产力在“十一五”期间相比“十五”期间有所提高，其余 11 个行业的能源生产力没有明显的改进。

Duan 等人^[54]考虑到节能和碳减排对发电成本的反作用，分别从动态和静态的角度考察了中国 30 个省区在 2005~2012 年间火电厂的能耗和 CO₂ 排放特点。该文对方向距离函数使用了息票剥离 (bootstrap) 来纠正可能估计偏差，并检验当纳入非期望产出的弱处置性时生产率变化的显著性。实证分析结果表明，息票剥离可避免样本不均引起的误差，中国火电厂能耗和 CO₂ 排放特点存在不同，技术进步是提高能耗和降低 CO₂ 排放的主要推动力。Hu 等^[55]指出，通过技术进步有望减少中国水泥行业的能源强度。政策激励是提高中国能源生产力的重要推动力，能源生产力的提高对地方官员决策起积极作用^[47]。

Du 等^[56]采用生产理论分解分析法，利用 Shephard 距离函数评估决策单元的生产效率，并结合 Fisher 系数分解法把能源生产力的提高分解为以下几个影响因素：技术效率提高，技术进步，资金-能源消耗比，劳动力投入-能源消耗比，能源结构，以及产出结构。他们以中国各省市的工业能源生产力为研究对象，将个省市分别看作决策单位，将能源结构分为电力能源消耗和非电力能源消耗，将产出结构分为轻工业产出和重工业产出，研究了 2005 年和 2010 年两年间的中国个省市工业能源生产力的变化，并得出以下结论：技术进步对中国能源生产力提高的贡献为 42.5%，是中国能源生产力提高的主要动力，而技术效率对能源生产力影响只起到轻微的负面作用；资金投入-能源消耗比对中国各省市能源生产力的提高起到十分重要的作用，资金投入-能源消耗比对能源生产力的平均贡献是 7.8%；劳动力投入-能源消耗比对能源生产力增长起负面作用；能源结构和产出结构对能源生产力影响较小。

Hu^[57]采用两步 DEA 模型法，把工业生产过程分成两个子过程：能源使用过程和污染物处理过程。该文用共享投入建立的两步 DEA 方法，避免了传统能效评估方法中的“暗箱”处理方式。文中以中国各省市工业领域为研究对象，分析了中国 2006 年至 2010 年期间中国工业领域的全要素生产效率，研究发现：中国工业在“十一五”期间全过程生产效率由 0.499 提升到了 0.770，有了明显的进步；中国工业在能源使用过程的效率高于污染物处理过程的效率，但是得益于“十一五”期间中国政府对环境保护的重视，一系列鼓励绿色生产企业和惩罚污染企业的环境保护政策的实施使

得中国工业在能源使用过程和污染物处理过程的效率差距越来越小。研究还把中国各省市划分成北方、东北、东部、中南、西南、西北六个区域，并对这六个区域平均的全要素生产效率做了分析。

Duan 等^[58]采用方向性距离函数的 DEA 算法对火力发电站的发电效率作了评估，该研究以资本、劳动力、化石燃料、电力作为投入，以发电量作为期望产出，并且在效率评估中将非期望产出 CO₂ 考虑在内，分别计算了中国各省市火力发电站的 Malmquist 能源生产力指数和 Malmquist CO₂ 生产力指数。该研究比较了煤、石油、天然气三种不同化石能源的 Malmquist CO₂ 生产力指数，发现天然气燃料的发电单位的 Malmquist CO₂ 生产力指数优于以煤或石油作为燃料的发电单位，指出优化发电结构有利于火力发电行业减排目标的实现。研究还发现技术进步是火力发电行业发电量提高和排放减少的主要动力，由于电站以利润最大化为目标，技术进步对提高发电量和减少 CO₂ 排放的贡献越来越大。

Zhang 等^[38]用 SBM 来评估江苏省 13 个地区工业领域的全要素 CO₂ 排放特性，实证分析结果表明，江苏地区每年工业 CO₂ 减排可达到 15654 千吨，占实际平均排放的 28.2%，这些减排量可通过提高生产技术、调整工业结构和提高工业集约化水平来实现。Choi 等^[59]也用非径向 SBM 基准的 DEA 模型来估算中国能源效率、减排潜力和减排成本。结果表明总 CO₂ 减排量可达到 1683 百万吨，平均各省 CO₂ 减排量为 56.1 百万吨，CO₂ 排放效率范围为 0.146~1，平均边际减排成本为 7.2 美元。

2.1.3 SFA 方法国内外工作综述

国外采用随机前沿分析法进行能源经济研究的文献有：Filippini M, Hunt L C(2010)^[18]使用随机前沿分析法 (SFA)，基于美国 48 个州在 1995 到 2007 年间的面板数据，估计得到了美国住宅总能源需求前沿函数，研究发现，能源强度不一定是较好的能源效率指标；HUANG, Akio, ONISHI(2015)^[19] 基于随机前沿分析法 (SFA) 分析了中国区域工业能源效率，研究结果表明，东部地区具有最佳的能源效率，中部和西部地区分别居于第二位和第三位，另外中国各省工业尚未达到前沿效率；Boyd G A, Lee J M(2016)^[20]基于随机前沿分析法 (SFA)，以美国五种不同的金属耐用制造业为研究对象，分析了 1987~2012 年间美国五种制造业的能源效率。国外采用数据包络分析法 (DEA) 分析能源经济状况的研究有：Rácz V J, Vestergaard N(2016)^[21]使用跨期

Malmquist 全要素生产率 DEA 方法分析了丹麦集中式沼气发电厂在 1992 到 2005 年间的效率和生产率的变化；Al-Refaie A, Hammad M, Li M H(2016)^[22] 使用数据包络分析(DEA)评估了 1999 年至 2013 年约旦工业部门的能源效率和能源生产力增长情况。

国内基于随机前沿分析法的研究有：王雄、岳意定、刘贯春（2013）^[23]运用随机前沿分析（SFA）模型对 1990—2010 年中部六省的能源效率进行了测算，结果表明，山西、安徽、河南、湖北和湖南 5 个省份的能源效率总体上呈现明显的上升趋势，而江西则呈现明显下降趋势；科技人力资源与能源效率显著负相关，地方财政科技投入和高科技产业规模与能源效率显著正相关。景超玮（2013）^[24]运用 SFA 参数分析方法对上海工业行业的全要素能源生产率进行了分析，结果发现，技术进步是全要素能源生产率的主要驱动因素，工业结构则是其主要抑制因素。续竞秦、杨永恒（2012）^[25]运用 SFA 法，对 2001 到 2010 年间我国各省市的能效进行评价，并分析了影响能效的主要因素，研究表明，样本期内大多数省份的能源效率经历了“先降后升”的变化趋势，转折点一般出现在 2006 年左右；我国能源效率总体水平仍不高，呈现出从东向西递减的区域分布特征；经济发展水平、电力占能源消耗比重和外商直接投资对能源效率具有显著的正效应，资本-劳动比和第二产业比重具有负向影响，各影响因素的作用在地区之间存在明显差异。国内采用数据包络分析法的能源经济相关研究有：李兰冰（2012）^[26]应用 DEA 模型，对 2005 到 2009 年间中国各省市的能效现状、改进途径进行了实证研究，发现我国全要素能源效率总体上仍处于较低水平，节能潜力大约为能耗现值的 30% 至 40%；管理无效率和环境无效率是能源低效的共同成因，现阶段能源效率提升主要依赖于外生环境改善，内源性管理效率提升的动力不足。汪克亮、杨宝臣、杨力（2011）^[27]利用数据包络分析和方向性距离函数建立能源效率测度新模型，对 2004 到 2008 年间我国的全要素能源效率及节能潜力进行了详细的分析，实证分析结果表明：中国能源效率整体水平较低，节能形势严峻，各省份、区域之间的能源效率差异显著，能源节约和产出增长还具有很大的潜力和空间。

2.1.4 国内外研究评述

以上内容分别从评价指标和研究方法两大方面对国内外能源经济系统的研究作了分类整理，可以发现，评价地区或行业的能源经济系统在很早之前就已成为国内外学术界的重点研究内容。通过对已有的研究进行整理总结，发现：1) 国内的研究通

常采用能源强度或能源效率指标去评价某个能源经济系统，而这两个指标总是被当作减少能耗的途径，但是经济的增长往往都伴随着能耗的增加，所以无论是降低能源强度还是提高能源效率对减少能耗来说都是失败的。而国外最近兴起的能源生产力指标避开了这一矛盾，该指标关注的是如何最大化每份能耗的经济收益，更有利于经济的持续稳定增长，所以国际上越来越多的国家已经开始采用能源生产力指标评估国家的能源经济系统。2) 这些已有研究大多针对国家、省际或国家行业层面进行能源生产力或能效分析，细化到具体省份具体行业的研究相对较少，且已有的少数细化研究也存在很多不足，例如，研究视角停留在工业层面，没有细化到工业各行业。(3) 国内外的研究在采用 SFA 和 DEA 法进行分析时，影响能源经济系统运行状况的因素考虑不够全面。

2.2 研究理论基础

从国内外学者的研究成果来看，目前关于能源经济系统的评价研究十分丰富。这些研究在方法上主要分为两大类：参数法和非参数法。参数法^[33]是在传统生产函数的基础上，根据研究对象构造具体的生产函数，通过极大似然估计法估计得到生产函数中事先设定的参数，从而分析能源经济系统的运行情况。索洛余值法和随机前沿生产函数法（SFA）是参数法中的典型代表，也是应用最广的两种方法。非参数法^[34]是基于线性规划进行分析，无需事先设定生产函数形式。非参数法主要包括数据包络分析法（DEA）、指数法等，其中 DEA 是最常见的非参数法。目前来说，在评价能源经济系统时最常用的方法是 SFA 和 DEA，此两种方法各有利弊，很难确定哪一种方法更好。

2.2.1 参数法

1957 年，美国著名经济学家罗伯特·索洛提出了一种评价能源经济系统的方法即索洛余值法，此方法因基于总量生产函数而被归类于参数法，该方法首次将技术进步考虑到经济增长模型中，解释了经济增长驱动因素中资本投入和劳动力投入解释不了的部分^[35, 36]。具体方法如下。

假设总量生产函数的形式为：

$$Y = AF(X) \quad (2-1)$$

其中， X 代表各项投入。对式(2-1)两边取自然对数，并求微分，结果如下：

$$\frac{dY}{Y} = \frac{dA}{A} + \sum_{n=1}^N \beta_n \frac{dX_n}{X_n} \quad (2-2)$$

其中， β_n 为每种要素投入的产出弹性，将(2-2)式变形后得到技术进步增长率的计算公式为：

$$\frac{dA}{A} = \frac{dY}{Y} - \sum_{n=1}^N \beta_n \frac{dX_n}{X_n} \quad (2-3)$$

索洛余值法并没有给定 $F(X)$ 的具体形式，在研究具体问题时可根据需要设定具体的 $F(X)$ 。例如，在使用柯布—道格拉斯（C-D）生产函数时，(2-3)式就变为以下公式：

$$\frac{dA}{A} = \frac{dY}{Y} - \beta_1 \frac{dK}{K} - \beta_2 \frac{dL}{L} \quad (2-4)$$

其中， $\frac{dY}{Y}$ 、 $\frac{dK}{K}$ 、 $\frac{dL}{L}$ 分别表示经济产出、资本投入及劳动力投入增长率； β_1 、 β_2 分别表示资本投入和劳动力投入的产出弹性。资本投入、劳动力投入及技术进步在经济产出中所作的贡献分别为 $\beta_1 \frac{dK/K}{dY/Y}$ 、 $\beta_2 \frac{dL/L}{dY/Y}$ 和 $\frac{dA/A}{dY/Y}$ 。

在采用索洛余值法时，除了使用 C-D 生产函数外，很多学者还会采用改进之后的 C-D 生产函数。例如，邱晓华等（2006）^[37]在 C-D 函数的基础上引入结构变量和制度变量，分析了中国经济增长的动力；Wei Chu 等（2007）^[38]在 C-D 函数中引入能源投入项，探讨了影响中国能源生产率的主要因素。

随机前沿生产函数法(SFA)是一种基于生产前沿理论的参数法。Aigner 等(1977)^[39]首次采用复合误差概念，开启了随机前沿分析的先河。SFA 将生产率的变化分解为生产前沿面的移动和技术效率的变化，比传统的生产函数法或者索洛余值法更接近生产和经济增长的实际情况^[40]。随机前沿生产函数法的特点是在生产函数中考虑了复合误差，复合误差被分为两部分：一部分是技术无效率项，用来衡量技术有效性，另一部分是随机误差项，用来反映统计噪音^[40, 41]。为了估计这两个误差项，相关学者做了很多研究：Jondrow 等（1982）^[42]采用 $\{u|v-u\}$ 条件分布的均值来测度技术无效率值，之后，研究者们又提出了技术无效率项服从半正态分布或指数分布的假设，这一

假设随后得到广泛应用。

最常见的随机前沿分析模型是由 Battese 和 Coelli 分别在 1992 年和 1995 年提出的两个基于时间序列面板数据的模型。这两个模型的不同之处在于 Battese 和 Coelli (1995) 建立了技术无效率模型, 将解释变量引入技术无效率项, 从而能够估计每个决策单元的效率水平, 同时能够解释影像技术效率水平的主要因素。

Battese 和 Coelli (1992) [43]模型如下:

$$Y_{it} = x_{it}\beta + (V_{it} - U_{it}) \quad (2-5)$$

式(2-5)中, 下标 i 表示决策单元, 下标 t 表示时间序列, Y 表示产出, x_{it} 是第 i 个决策单元在 t 时期的 $k \times 1$ 投入要素向量, β 是待估参数向量。 V_{it} 是随机误差项, 假设其服从 $iidN(0, \sigma_v^2)$, 独立于 U_{it} ; U_{it} 是非负随机变量, 表示技术无效率项, 假设其服从分布 $iidN^+(\mu, \sigma_v^2)$ 。

Battese 和 Coelli (1995) [44]模型中假设 U_{it} 服从 $iidN^+(m_{it}, \sigma_v^2)$, 其中 $m_{it} = z_{it}\delta$, z_{it} 是技术效率影响因素向量, δ 是待估参数向量。采用 SFA 时, 亦需要事先设定生产函数形式, 常用的生产函数有 C-D 生产函数、超越对数生产函数等。

此后, 很多学者在 BC (1992) 和 BC (1995) 的基础上, 不断地改进生产函数形式, 从而形成了多种多样的改进型 SFA 法。 Rasche R H, Tatom J A (1977) [45]将能源作为投入要素添加到 C- D 函数中, 并为其后评价能源经济系统提供了一个参考框架[46]。随后, 一些学者为了研究环境-能源-经济三者之间的关系, 将环境要素引入生产函数, 构建了评价环境、能源与经济体系的研究方法。例如, 陈诗一 (2009) [47]把二氧化碳排放量作为与资本、劳动等传统要素并列的投入要素引入超越对数生产函数, 估算中国工业领域不同行业的生产率, 从而分析环境对中国工业可持续发展的影响; 李卫坤 (2010) [41]将环境污染作为产出要素考虑到随机前沿生产函数中, 分析了环境污染等因素对能效的影响机理; 张金灿、仲伟周 (2015) [48]以碳排放率为核心评价指标, 实证分析了碳排放率的影响因素。

索洛余值法与 SFA 法都是基于生产函数, 运用回归分析法探讨生产过程中的投入-产出关系。但是, 相比于索洛余值法, SFA 法考虑到技术无效率的存在, 将全要素生产率的变化分解为生产可能性边界的移动和技术效率的变化, 结果更接近生产和

经济增长的实际情况。

2.2.2 非参数法

相比于参数法，非参数法的模型形式较为复杂。非参数法起始于 1957 年，Farrell (1957)^[49]提出：通过选择有效的生产单元去计算生产函数的有效生产边界，为生产边界理论进入实证研究阶段奠定了基础。之后，Boles (1966)^[50]提出用数学规划方法进行生产边界实证研究，在理论与实证之间架起桥梁。直到 1978 年，Charnes 等 (1978)^[51]首次提出“数据包络”这一术语之后，数学规划方法才得到学术界的重视。

数据包络分析法的英文全称是 Data Envelopment Analysis，简称为 DEA。数据包络分析法实质上是通过对线性规划技术，构造一个非参数分段线性前沿面，将所有观测数据包络起来。DEA 法通常被用于相对效率的测度，是管理学及系统研究中常用的效率评价工具^[52]，在能效评价中尤为常见。最早的 DEA 模型是由 Charnes 等^[51]在 1978 年提出的规模效应不变 CCR 模型。随后，大量的学者对 DEA 进行改进，使 DEA 法得到了快速全面的发展。1984 年，R.D.Banker 等^[53]认为规模报酬不可能同时达到最优，提出了用于计算技术效率的规模效应可变 BCC 模型^[41, 52]。此后不久，在 1985 年，Charnes 等人又提出了一种新的 DEA 模型，即 C2GS2 模型。该模型是对规模效应不变 CCR 法的进一步拓展，打破了 CCR 模型中关于生产可能集必须为凸集的限制。目前，DEA 模型仍在不断地被更新、改进，这些改进模型极大地提高了非参数法在能源经济系统评价中的灵活性和适用性^[41]。

与 SFA 法相比，DEA 法无需事先假设生产函数的具体形式。DEA 模型既适用于评价多投入、单产出问题又适用于评价多投入、多产出问题。经过长期的改进与发展，DEA 已被广泛地应用于生产系统、能源经济系统的效率评价中。

2.2.3 参数法和非参数法对比

在研究能源效率或评价能源经济系统时最常用的方法是 SFA 和 DEA，两种方法各自的特点如表 2-1 所示。

表 2-1 SFA 和 DEA 的特点比较

方法 特点	随机前沿分析法 SFA	数据包络分析法 DEA

所属类别	参数法	非参数法
是否考虑随机误差	是	否
是否存在无效率假设	是	是
是否需要设定生产函数形式	是	否
是否需要设定无效率项	是	否
是否适用于时间序列数据	否	否
是否适用于横截面数据	是	是
是否适用于面板数据	是	是
是否适用于多投入、多产出系统	否	是

在评价能源经济系统时，SFA 和 DEA 各有自己的优势和劣势。SFA 法的优点如下：1) 模型中考虑了随机误差项，可用来研究白噪声；2) 可用来进行传统假设检验；3) 可进一步分解技术无效率项，研究引起技术无效率的主要因素；4) 模型形式较为简单，对量纲要求低。但是 SFA 法需要事先设定生产函数具体形式和误差项的分布形式，不符合实际情况的假设会影响模型的准确性。DEA 有以下优势：1) 无需事先设定生产函数具体形式，受主观假设的影响比较小，评价结果更具客观性；2) 可用于多项投入、多项产出的复杂经济系统，可灵活处理非期望产出和期望产出。但是 DEA 只能用于相对效率评价，有一定的局限性，且模型中没有考虑随机误差的影响，影响结果与实际情况的符合度。因此，在评价生产系统或经济系统时，需要根据具体研究情况去选择合适的研究方法。

关于 SFA 和 DEA 方法在效率研究中的优劣性，国内外的学者做了大量的比较研究。例如，Jun-Yen Lee (2005)^[54]同时采用 SFA 和 DEA 法分析了 79 个林纸公司的技术效率，结果发现两种方法所得结论虽有差异，但基本趋势一致，因此认为两种方法都可用于技术效率衡量研究；谢洪军、任玉珑 (2006)^[55]研究了包括 SFA 和 DEA 在内的五种前沿分析方法，发现非参数法和参数法由于各自假设的不同会导致以下现象：使用相同的样本数据所得到的结果却存在差异，从而很难确定哪一种方法更符合实际情况；刘元丽 (2014)^[56]采用 DEA 法和 SFA 法估算了期货行业各公司在 2011 和 2012 年的收入技术效率，并比较分析了两种方法的结果，结果显示两种方法得到的估算结果差异明显，但是两种方法关于效率的排序却存在一致性；Seog-Chan Oh 和 Jaemin Shin (2015)^[57]采用 SFA 和 DEA 分析了绩效预算评估的准确性，结果表明：

测量误差较小时 SFA 优于 DEA，反之 DEA 优于 SFA。傅晓霞、吴利学（2007）^[34] 基于 1978 年到 2004 年的省际面板数据，分析比较了 SFA 和 DEA 法在全要素生产率核算中的适用性，结果表明相较于 DEA，SFA 更适合分析中国的生产率，其结论也比 DEA 更为可靠；魏下海、余玲铮（2011）^[58] 运用随机前沿分析法和数据包络分析法，基于中国 29 个省份的面板数据，对全要素生产率进行了估算并针对两种估算方法做了适用性分析，结果表明 DEA 方法得到的结论比 SFA 法更为可靠，更适用于分析中国当前的经济现实。综上可见，学术界对于 SFA 和 DEA 两种方法的优劣还没有达成一致的意见，比较多的学者认为两种方法各有利弊，在分析相同的问题时结论存在差异但基本趋势一致。因此，在评价能源经济系统时，可根据具体需要选择合适的方法。

2.2.4 本报告研究方法概述

综合上述对比，本报告在研究中国工业领域能源生产力时，将基于全要素的理论，分别用上述两种方法进行对比研究。能源自身并不能带来任何产出，能源必须和其他生产要素结合才能生产产品，例如科技、人力、资源结构、资本等^[11]。因此，采用多投入模型才能正确衡量能源的利用效率。产出中，除包含正面的期望产出外，能源消费过程中还不可避免的会产生污染物，这些污染物即为非期望产出。换句话说，衡量能源生产力最科学的方式是从全要素能源效率的角度来衡量，如图 2-1 所示。能源生产力的概念提供了理解能源消费与经济增长发展关系的总体框架。能源生产力的提高可以通过减少能源投入需求但生产相同的能源相关的产品与服务，或投入相同的能源但创造更多更好的经济产出。因此，关注能源生产力的重点应该在于如何提高能源效率以及推动实质性的系统改进与优化。

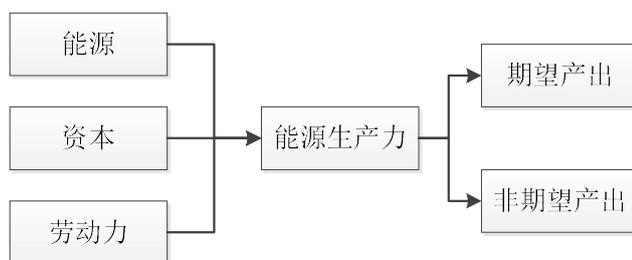


图 2-1 能源生产力构成

传统对能源效率的测量是以物理量的形式，忽视了经济成本以及能源与其它因素（如资本和劳动力）之间的不可替代性。在现实世界中，最小的能源投入并不总是生

产过程中的最佳因素。生产的目的是最小化全要素成本或最大化收益，而不是最小化某种物理投入。最佳要素组合不仅受限于技术，同样还受限于各要素的相对价格。因此，基于生产理论和数学规划，本报告以全要素能源生产力为分析指标，分别用 DEA 和 SFA 来全面剖析中国工业领域能源生产力变化。

2.3 SFA 方法介绍

在用 SFA 评价能源生产力时，分别从国家和上海层面探讨影响工业领域能源经济系统运行状况的主要因素，并估算工业行业的技术效率。由于参数法以回归分析为基础，能够考虑环境变化和随机因素对生产行为的影响，且形式简单、便于估计和分解，因此本报告将采用参数法进行相关分析。因为 SFA 法可对白噪声进行处理，且模型自身可对估算结果进行假设检验，对技术效率值的估算也为精确；此外，经过不断改进后的 SFA 模型不仅改善了衡量效率的功能，还提高了效率测度的准确性^[59]，所以本报告将以参数法中的 SFA 法作为本报告的主要研究方法，同时采用索洛余值法作辅助分析。

2.3.1 能源生产力模型设定

能源生产力的定义如下：

$$\eta_t = \frac{Y_t}{E_t} \quad (2-6)$$

其中， η_t 为 t 时期的能源生产力，单位：亿元/万吨标煤； Y_t 表示 t 时期的经济输出即 GDP，单位：亿元； E_t 表示 t 时期的能源输入，单位：万吨标煤。由式(2-6)可知，能源生产力的大小取决于经济输出量和能源输入量，因此影响经济输出或能源输入的因素也会影响能源生产力。本报告将从经济输出方面考虑影响能源生产力的主要因素，分解相关系数。

确定随机前沿生产函数形式是采用 SFA 法评价能源经济系统的基础和前提，常用的生产函数形式有柯布-道格拉斯（C-D）生产函数、线性生产函数和超越对数（Translog）生产函数等。根据研究需要，很多学者会对这些基本的生产函数加以改进，形成更适合自己研究内容的生产函数。本报告将采用引入能源要素后的 C-D 函数。此后，学术界认为环境与能源经济系统有着不可分割的关系，为了更好的评价能源经济系统，将环境因素引入生产函数。通常，学者会将非期望产出项考虑到生产函

数中，以表征环境要素。在考虑非期望产出时，很多国内外的学者选用“二氧化碳排放量（非期望产出）”作为环境要素的表征指标，例如张金灿、仲伟周（2015）^[48]、陈诗一（2009）^[47]等。已有研究在处理二氧化碳排放这一变量时通常采用以下两种方法，一是将二氧化碳排放量作为投入要素引入生产函数，例如陈诗一（2009）^[47]等；二是将二氧化碳排放量作为非期望产出引入生产过程，例如 Duan N, Guo J P, Xie B C（2016）^[60]等。由于 SFA 法只适用于单产出模型，所以本报告采用第一种方法，即将二氧化碳排放量作为投入要素引入 C-D 生产函数，从而探讨环境因素对能源生产力的影响。二氧化碳作为投入要素引入模型时，一般有两种解释方法：第一，将二氧化碳投入项看作环境承载能力，即一种无形的环境资源投入要素；第二，将二氧化碳投入项看作治理环境污染所投入的成本要素。至于二氧化碳投入项到底选用哪一种解释方法，要具体问题具体分析。

采用回归法估计生产函数的精确性取决于回归方程中的解释变量，而技术进步对能源生产力的影响不可忽略，所以还需在生产函数中考虑技术项。鉴于 SFA 法中的 Battese 和 Coelli（1995）模型已将解释变量引入技术无效率项，相当于已考虑了技术要素对能源经济系统的影响，所以本报告在采用 SFA 法做分析时生产函数中不在添加技术要素项。但是，在采用索洛余值法做能源生产力分析时，为了提高模型的准确性，本报告将把技术要素作为一项投入考虑到生产函数中。已有的研究对技术要素的处理办法主要有三种：a、在回归方程中不考虑技术水平；b、以时间趋势项代替技术水平；c、以第三产业劳动力投入占比作为技术水平的替代变量，例如曹吉云（2007）^[35]。忽略技术水平会使参数估计值出现非常大的偏误，且时间趋势不能完全反映技术进步，所以 a、b 两种处理方法都不恰当，第三产业劳动力投入占比才是技术水平的合意替代变量^[35]，本报告将选择第三产业的劳动力投入占比来表征技术要素。

综上，本报告采用的参数法模型示意图如图 2-2 所示：在考虑能源经济系统时，将其分为三部分：投入要素、生产过程和产出要素。本报告着重考虑资本、劳动力、能源、二氧化碳排放和技术五个投入要素，以经济产出或经济指标作为产出要素，探讨工业能源经济系统的投入-产出关系，并分析生产过程中的生产效率情况。

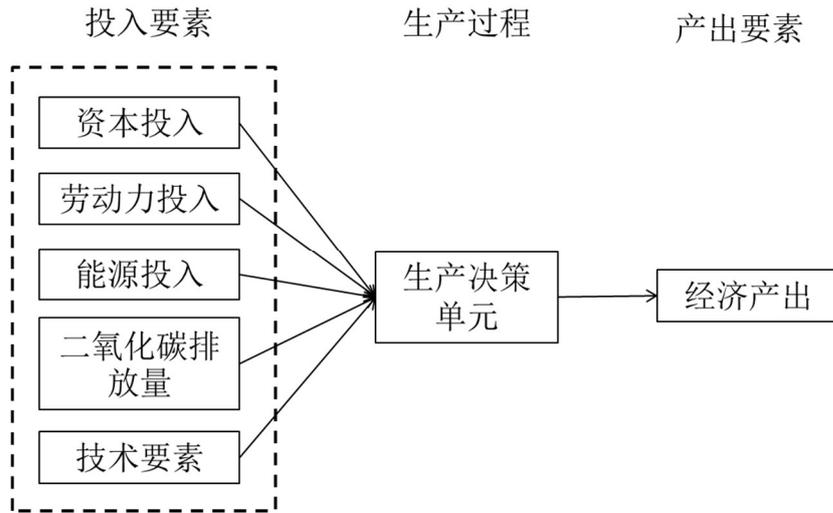


图 2-2 参数法模型示意图

2.3.2 SFA 实证模型

在评价国家层面的能源生产力时，本报告采用 Battese 和 Coelli 在 1995 年提出的 BC（1995）随机前沿模型，此模型将技术效率表示为效率影响因素的函数，对技术效率的研究不再局限于数值大小的测算及比较上，开始从技术效率的主要影响成分方面进行研究^[33]。该模型的具体形式为：

$$y_{it} = f(x_{it}; \beta) \exp(v_{it} - u_{it}) \quad (2-7)$$

式(2-7)中， y_{it} 、 x_{it} 分别表示 i 行业在 t 年份的产出和投入要素； β 是待估系数向量， $f(x_{it}; \beta)$ 为生产前沿面； v 为随机误差项， $v_{it} \sim N(0, \sigma_v^2)$ 且独立于 u ，用于表示统计误差和各种随机因素对前沿面的影响； $u \geq 0$ 是随时间变动的生产无效率项，

$u_{it} \sim N^+(m_{it}, \sigma_u^2)$ ，其中 $m_{it} = \delta_0 + \sum_{i=1}^n z_{it} \delta_i$ ， z_{it} 为影响技术效率的因素， δ 为待估参数。

由 2.2.4 可知本报告采用的随机前沿生产函数模型中包括资本投入、劳动力投入、能源投入三个投入要素和经济产出、二氧化碳排放量两个产出要素。具体随机前沿分析模型的表达形式如下：

$$\ln y_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln K_{it} + \beta_2 \ln L_{it} + \beta_3 \ln E_{it} + \beta_4 \ln C_{it} + v_{it} - u_{it} \quad (2-8)$$

式(2-8)中， y_{it} 表示 i 行业在 t 年份的经济产出； K_{it} 、 L_{it} 、 E_{it} 、 C_{it} 分别表示 i 行业在 t 年份的资本存量、劳动力投入、能源投入和碳排放量； β_0 为常数项， β_1 、 β_2 、 β_3 、

β_4 分别表示资本存量、劳动力投入、能源投入、碳排放量对经济产出的影响系数；

$v_{it} - u_{it}$ 表示方程的复合误差。

在已有相关研究的基础上，本报告主要从能源消费结构方面考察上海市工业领域的生产效率状况。选取煤炭消费比重、石油消费比重、天然气消费比重和电力消费比重作为技术效率的影响因素，无效率模型的具体形式如下：

$$m_{it} = \delta_0 + \delta_1 R_{it} + \delta_2 O_{it} + \delta_3 N_{it} + \delta_4 P_{it} \quad (2-9)$$

式(2-9)中， R_{it} 、 O_{it} 、 N_{it} 、 P_{it} 分别表示 i 行业在 t 年份的煤炭消费比重、石油消费比重、天然气消费比重和电力消费比重； δ_0 为常数项，系数 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 分别表示各因素对技术效率的影响程度，系数为正值则表明该影响因素对技术效率有负面影响，反之则有积极的影响。

定义 $\gamma = \frac{\sigma_u^2}{\sigma_v^2 + \sigma_u^2}$ ， γ 反映技术无效率项在随机扰动项中所占的比重，通过 γ 值得

大小可判断采用 SFA 模型是否合适。如果 $\gamma=0$ ，表示实际产出偏离前沿产出完全是由随机误差引起的，采用 OLS 法即可，没有必要采用 SFA 模型；如果 $0 < \gamma < 1$ ，说明实际产出偏离前沿产出的误差是由随机误差和技术无效率共同引起的，且如果 γ 越接近 1 表示误差主要来源于技术无效率，采用 SFA 模型就越合适；如果 $\gamma=1$ ，表示实际产出偏离前沿产出完全是由技术无效率引起的^[33]。生产者的技术效率 (TE) 定义为：

$$TE_{it} = \exp(-u_{it}) \quad (2-10)$$

2.4 DEA 方法介绍

为了构建同时满足全要素生产率、考虑副产出、基于生产要素的影响因素分解的能源生产力影响因素评估模型，此处以中国工业领域为研究案例，推广了 Du^[60]和 Wang^[26]等人的生产理论分解分析 (production-theoretical decomposition analysis, PDA)，并对 Shephard 生产函数新增了副产品这一影响因素。对工业领域而言，副产出往往也会影响企业以及政府层面的决策，如废气、废水、SO₂ 和 CO₂ 等^[44, 53, 57]。为此，结合国家节能减排政策以及碳减排目标，本报告的研究工作中将纳入副产出 CO₂ 综合

考虑。传统的 Shephard 函数只有对投入和产出的处理项，没有对副产出区别于期望产出的处理项。此外，不同的生产要素数量对应不同的 Fisher 系数分解结果，本报告新增的影响因素 CO₂ 使得本报告的 PDA 模型相较于 Du^[60]和 Wang^[26]等的模型更加全面。后续将对该模型的建立进行详细介绍。

2.4.1 生产技术集合理论

为了便于描述多投入、多产出的生产过程，本报告参照 Färe 和 Primont (1995) 的研究理论，假设有 n 个生产决策单元(生产决策单元可以是公司、企业等生产部门)，运用劳动力 L ，资本 K ， p 种能源 E^1, E^2, \dots, E^p 生产 m 种期望产出 Y^1, Y^2, \dots, Y^m 和非期望产出 C ，其中 $L, K, E^1, E^2, \dots, E^p$ 和 Y^1, Y^2, \dots, Y^m, C 都是 $n \times 1$ 阶的向量，并且它们的元素都是非负实数，令 $E = [E^1, E^2, \dots, E^p]$ ， $Y = [Y^1, Y^2, \dots, Y^m]$ ，则时间 t 的生产技术集合 T 可以表示为：

$$T^t = \{ (L_t, K_t, E_t, Y_t, C_t) : (L_t, K_t, E_t) \text{ 能生产 } (Y_t, C_t) \} \quad (2-11)$$

这里的生产技术就是指生产过程，生产技术集合 T^t 的意义就是所有可以实现的生产过程的投入、产出、包括非期望产出向量的集合，值得注意的是生产技术 T 只是上述生产要素的集合，集合 T^t 中并没有定义生产要素之间函数关系式，因而这里的生产技术集合 T^t 不是生产函数。

上述生产技术集合 T^t 可以等价包含对应的产出集合 P^t ， P^t 的数学定义式为

$$P^t = \{ (Y_t, C_t) : (L_t, K_t, E_t) \text{ 能生产 } (Y_t, C_t) \} = \{ (Y_t, C_t) : (L_t, K_t, E_t, Y_t, C_t) \in T^t \} \quad (2-12)$$

产出集合具有以下性质：

- (1) $0 \in P^t$ 。存在某些组合的投入无法获得产出的情况。
- (2) 若 $L_t, K_t, E_t = 0$ ，则 $Y_t, C_t = 0$ 。即没有投入就没有产出。
- (3) 产出集合的产出变量具有强可处置性。即如果在技术条件 T^t 下，投入 (L_t, K_t, E_t) 能生产数量（或质量）为 (Y_t, C_t) 的产品，那么在相同投入 (L_t, K_t, E_t) 和技术条件 T^t 下就一定生产数量（或质量）比 (Y_t, C_t) 更少（或更低）的产品。
- (4) 产出集合的投入变量具有强可处置性。即如果在技术条件 T^t 下，投入 (L_t, K_t, E_t) 能生产数量（或质量）为 (Y_t, C_t) 的产品，则在相同技术条件 T^t 下使用比 (L_t, K_t, E_t) 数量更多（或质量更高）的投入也能生产出数量（或质量）为 (Y_t, C_t) 的产品。

(5) 产出集合 P^t 是闭合的。

(6) 产出集合 P^t 是有界的。即有限的投入得到的产出也是有限的。

(7) 产出集合 P^t 是凸函数。

除此之外，关于期望产出和非期望产出还有两个重要的公理：

副产品公理 (Byproducts Axiom) :若 $(Y_t, C_t) \in P^t$ 且 $C_t=0$ ，则 $Y_t=0$ ；该公理的含义是期望产出和非期望产出是同时产生的，不可能在没有非期望产出产生的情况下获得期望产出。

弱可处置公理 (Weak Disposability of Outputs Axiom)：若 $(Y_t, C_t) \in P^t$ 且 $0 \leq \beta \leq 1$ ，则 $(\beta Y_t, \beta C_t) \in P^t$ ；若可处置公理表示期望产出和非期望产出呈正相关，增加期望产出同时会使非期望产出增加，减少非期望产出一定程度上也会到时期望产出的减少。

2.4.2 考虑副产出的 Shephard 产出距离函数

本报告采用的是基于产出的 Shephard 距离函数可以定义为：

$$\begin{aligned} D_t(L_t, K_t, E_t, Y_t, C_t) &= \inf\{\Theta: (L_t, K_t, E_t, Y_t/\Theta, C_t) \in T^t\} \\ &= \inf\{\Theta: (Y_t/\Theta, C_t) \in P^t\} \end{aligned} \quad (2-13)$$

上述 Shephard 距离函数表示的是在给定投入 (L_t, K_t, E_t) 和生产技术 T^t 的条件下，被研究的生产过程和理想生产过程的差距。因此 $Y_t / D_t(L_t, K_t, E_t, Y_t, C_t)$ 代表给定投入 (L_t, K_t, E_t) 和生产技术 T^t 的条件下的理想产出。上述 Shephard 距离函数的结果，也就是一定投入和确定的生产技术条件下实际产出与理想产出的比值被定义为技术效率，生产决策单元位于前沿面上时生产效率等于 1，我们称该决策单元是技术有效的；而当生产决策单元位于前沿面内时生产效率小于 1，此时决策单元是技术无效的。

为更形象地说明基于产出的 Shephard 距离函数和 DEA 法的生产前沿面，假设投入要素 (L_t, K_t, E_t) 在生产活动中产出两类期望产出 (Y_t^1, Y_t^2) 和非期望产出 C_t ，则该生产技术可以由图 2-2 表示。图中曲线 GACH 和坐标轴包围的区域表示产出集合 P^t ，曲线 GACH 表示生产前沿面。例如假设某一生产决策单位在某一确定生产投入下的产出为 Y_t^2 和 Y_t^1 ，对应图 2-2 中的 B 点，Shephard 距离函数值 Θ 表示的是生产活动的生产效率，对应 B 点的生产效率即 B 点到生产前沿面 GACH 的相对距离，即 $\Theta_B = OB/OC$ 。显然对于生产集合中任意一点，必然存在生产效率 $\Theta \leq 1$ 。

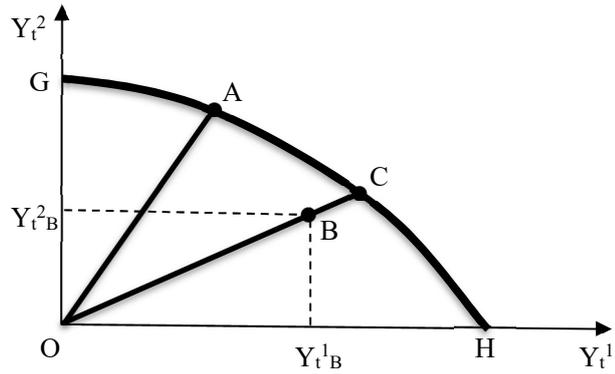


图 2-3 产出距离函数和生产前沿面

图 2-3 中 B 点位于生产前沿面 GACH 内， $\Theta_B < 1$ ，我们称 B 点对应的生产决策单元是技术无效的；A，C 两点位于生产前沿面 GACH 上，它们的生产效率 $\Theta_A, \Theta_C = 1$ ，因此我们称 A 点和 C 点对应的生产决策单元是技术有效的。

在已有生产率评估的研究当中，对诸如 CO_2 之类和环境相关的副产出的处理有两种方式，一种是把 CO_2 作投入处理，原因是 CO_2 和投入有个共同点：当产出一定时， CO_2 和投入都是越少越好；另一种处理方法是把 CO_2 当做副产出，在数据处理上既不同于投入也不同于产出。后续将会对这两种不同的处理方式的能源生产力评价结果进行比较。

当 CO_2 作为投入时，上述基于产出的 Shephard 距离函数的 DEA 模型为：

$$D_t^v(L_r, K_r, E_r, Y_r, C_r) = \text{Min}\Theta \quad (2-14)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n \lambda_i Y_i^j \geq \frac{Y_r^j}{\Theta}, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i L_i \leq L_r$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i K_i \leq K_r$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i E_i^k \leq E_r^k, \quad k = 1, 2, \dots, p$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i C_i \leq C_r$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

$$\lambda_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式 (2-14) 中 $D_t^v(L_r, K_r, E_r, Y_r, C_r)$ 的 L_r, K_r, E_r, Y_r, C_r 代表被研究的生产决策单元的各个生产要素值, 对应生产前沿面中的点; 下标 t 代表评估该生产决策单元生产效率时所参考的是 t 时刻的生产技术集合 T^t , 限制条件中的 L_i, K_i, E_i, Y_i, C_i 即生产技术集合 T^t 中的元素, 在本章的下一节将涉及不同时刻能源生产力的比较, 同时会用到不同时刻的生产技术集合; 上标 v 代表规模效益可变 (variable return to scale, VRS) 假设, 如果去掉约束 $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, 则变成规模效应不变假设, 实际生产活动中生产单元在不同的生产阶段生产规模对效益会有不同的影响, 可分为规模效益增大、规模效益不变 (constant return to scale, CRS)、规模效益减小三种情况, 因此规模效益可变更符合实际生产。后续将会对 VRS 和 CRS 的两种假设下的能源生产力作比较分析。

本报告针对传统 Shephard 函数在处理副产出方面存在的不足, 新增了对副产出的处理项。考虑新的副产出后, 基于产出的 Shephard 距离函数的 DEA 模型为:

$$D_t^v(L_r, K_r, E_r, Y_r, C_r) = \text{Min} \Theta \quad (2-15)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i Y_i^j \geq \frac{Y_r^j}{\Theta}, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i L_i \leq L_r$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i K_i \leq K_r$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i E_i^k \leq E_r^k, \quad k = 1, 2, \dots, p$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i C_i = C_r$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

$$\lambda_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

对比式 (2-14) 和式 (2-15) 可以发现, CO₂ 作为投入处理的 Shephard 距离函数中 CO₂ 相关的约束项为 $\sum_{i=1}^n \lambda_i C_i \leq C_r$, 与式 (2-14) 中其它投入要素相关的约束项相同, 采用的是不等式约束; CO₂ 作为副产出处理时的 Shephard 距离函数中 CO₂ 相关约束项为 $\sum_{i=1}^n \lambda_i C_i = C_r$, 采用的是等式约束, 与式 (2-15) 中其它生产要素相关的约束项都不相同。

本报告对投入要素和期望产出要素采用不等式约束、对非期望产出采用等式约束这种处理方式在 DEA 法评价生产效率的研究中不是先例, 现有的考虑副产出的方向性距离函数和 SBM 方向性距离函数都是采用这种方法。

2.4.3 考虑副产出的 PDA 数学模型

本报告在 Du^[60]和 Wang^[26]的 PDA 模型基础上添加了新的生产要素 CO₂, 用以考查两个不同时刻 t 和 s 间能源生产力的变化, 以 t 时刻的生产技术集合为参考, 能源生产力影响因素分解过程如下:

$$\frac{\bar{Y}_s/\bar{E}_s}{\bar{Y}_t/\bar{E}_t} = \frac{\left(\frac{\bar{Y}_s}{D_t(L_s, K_s, E_s, Y_s, C_s)}\right)/\bar{E}_s}{\underbrace{\left(\frac{\bar{Y}_t}{D_t(L_t, K_t, E_t, Y_t, C_t)}\right)/\bar{E}_t}_{PEPCH_t}} \times \frac{D_s(L_s, K_s, E_s, Y_s, C_s)}{\underbrace{D_t(L_t, K_t, E_t, Y_t, C_t)}_{TEC}} \quad (2-16)$$

$$\times \underbrace{\frac{D_t(L_s, K_s, E_s, Y_s, C_s)}{D_s(L_s, K_s, E_s, Y_s, C_s)}}_{TC(s)}$$

等式 (2-16) 的左边表示 s 时刻和 t 时刻能源生产力的比值, 即从 t 时刻到 s 时刻能源生产力的变化, 其中 $\bar{Y}_t = \sum_{j=1}^m Y_t^j$, $\bar{E}_t = \sum_{k=1}^p E_t^k$, 分别表示被研究生产决策单元 t 时刻所有期望产出总和、所有能源消耗总和; 同理, \bar{Y}_s 和 \bar{E}_s 分别表示被研究生产决策单元 s 时刻所有期望产出总和、所有能源消耗总和。从等式 (2-16) 的右边可以看到, 能源生产力的变化被分解为三个因素——PEPCH_t, TEC 和 TC (s)。

在本章的上一小结中已经提到过 $Y_t/D_t(L_t, K_t, E_t, Y_t, C_t)$ 代表的是被研究生产决策单元在以 t 时刻的生产技术作为参考时的理想产出, 相应的 $\bar{Y}_t/D_t(L_t, K_t, E_t,$

Y_t, C_t)和 $\bar{Y}_s/D_t(L_s, K_s, E_s, Y_s, C_s)$ 表示两个处于不同时刻的被研究生产决策单元在以 t 时刻的生产技术作为参考时的理想总产出。因此, $(\frac{\bar{Y}_t}{D_t(L_t, K_t, E_t, Y_t, C_t)})/\bar{E}_t$ 和 $(\frac{\bar{Y}_s}{D_t(L_s, K_s, E_s, Y_s, C_s)})/\bar{E}_s$ 分别表示生产决策单元在两个时刻的理想能源生产力, PEPCH_t表示理想能源生产力变化量。

等式 (2-16) 右侧的第二项 TEC 是生产决策单元在时刻 s 和时刻 t 的生产效率 $D_s(L_s, K_s, E_s, Y_s, C_s)$ 和 $D_t(L_t, K_t, E_t, Y_t, C_t)$ 的比值, 因而 TEC 表示生产效率变化量。

等式 (2-16) 右侧的第三项是生产活动 $(L_s, K_s, E_s, Y_s, C_s)$ 在 t 时刻和 s 时刻到生产前面的相对距离比值, 代表技术进步量。

利用线性规划的齐次性, 理想能源生产力变化 PEPCH_t项可以作如下等式变换

$$\begin{aligned}
 PEPCH_t &= \frac{(\frac{\bar{Y}_s}{D_t(L_s, K_s, E_s, Y_s, C_s)})/\bar{E}_s}{(\frac{\bar{Y}_t}{D_t(L_t, K_t, E_t, Y_t, C_t)})/\bar{E}_t} = \frac{D_t(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t) \times \bar{E}_t}{D_t(L_s, K_s, E_s, y_s, C_s) \times \bar{E}_s} \\
 &= \frac{D_t(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t)/D_t^c(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t)}{D_t(L_s, K_s, E_s, y_s, C_s)/D_t^c(L_s, K_s, E_s, y_s, C_s)} \\
 &\quad \times \frac{D_t^c(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t) \times \bar{E}_t}{D_t^c(L_s, K_s, E_s, y_s, C_s) \times \bar{E}_s} \tag{2-17} \\
 &= \frac{D_t(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t)/D_t^c(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t)}{D_t(L_s, K_s, E_s, y_s, C_s)/D_t^c(L_s, K_s, E_s, y_s, C_s)} \\
 &\quad \times \frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)}
 \end{aligned}$$

(2-17) 中, 产出结构 $y_t = (\frac{Y_t^1}{\bar{Y}_t}, \dots, \frac{Y_t^m}{\bar{Y}_t})$, $y_s = (\frac{Y_s^1}{\bar{Y}_s}, \dots, \frac{Y_s^m}{\bar{Y}_s})$; 能源投入 $e_t = (\frac{E_t^1}{\bar{E}_t}, \dots, \frac{E_t^p}{\bar{E}_t})$, $e_s = (\frac{E_s^1}{\bar{E}_s}, \dots, \frac{E_s^p}{\bar{E}_s})$; 劳动力-能源比 $l_t = L_t/\bar{E}_t$, $l_s = L_s/\bar{E}_s$; 资本-能源比 $k_t = K_t/\bar{E}_t$, $k_s = K_s/\bar{E}_s$; 碳排放-能源比 $c_t = C_t/\bar{E}_t$, $c_s = C_s/\bar{E}_s$ 。距离函数 $D_t^c(\cdot)$ 的上标 c 代表 CRS 假设, 对于式 (2-17) 中没有上标的距离函数 $D_t(\cdot)$, 表示该距离函数既可以是 VRS 假设也可以是 CRS 假设, 能够适应实际生产活动的规模效益变化情况。由

于 VRS 相对于 CRS 符合实际生产，因此本报告中如果不做特殊说明， $D_t(\cdot)$ 在计算中都用 VRS 假设的距离函数 $D_t^v(\cdot)$ 代替。

式 (2-17) 中的第二项 $D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)/D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)$ 表示 CRS 假设下劳动力-能源比变化、资本-能源比变化、能源投入变化、碳排放-能源比变化、产出结构变化对能源生产力变化的总影响。利用广义的 Fisher 系数分解法可以把 $D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)/D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)$ 分解成五个 CRS 生产技术集合条件下影响因素：劳动力-能源 (LE_t^c)、资本-能源比 (KE_t^c)、能源投入 (ES_t^c)、碳排放-能源比 (CE_t^c)、产出结构 (OS_t^c)：

$$\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)} = LE_t^c \times KE_t^c \times ES_t^c \times CE_t^c \times OS_t^c \quad (2-18)$$

式 (2-18) 中的 LE_t^c , KE_t^c , ES_t^c , CE_t^c , OS_t^c 的代数式如下：

$$\begin{aligned}
LE_t^c &= \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/5} \\
&\quad \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_t)} \right)^{1/5} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \\
&\quad \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \\
&\quad \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \\
&\quad \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_t)} \right)^{1/20} \\
&\quad \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_t)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \\
&\quad \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \\
&\quad \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \\
&\quad \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_t)} \right)^{\frac{1}{30}} \\
KE_t^c &= \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/5} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_t)} \right)^{1/5} \\
&\quad \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \\
&\quad \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
&\quad \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
&\quad \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_t)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_t)} \right)^{1/20}
\end{aligned} \tag{2-19}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_t)} \right)^{\frac{1}{30}} \quad (2-20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
ES_t^c &= \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/5} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_t)} \right)^{1/5} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_t)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_t)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_t)} \right)^{\frac{1}{30}} \quad (2-21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
OS_t^c &= \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/5} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/5} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_t)} \right)^{\frac{1}{30}} \quad (2-22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
CE_t^c &= \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/5} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/5} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_s)} \right)^{\frac{1}{30}} \quad (2-23)
\end{aligned}$$

式(2-17)中的第一项 $\frac{D_t(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t)/D_t^c(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t)}{D_t(L_s, K_s, E_s, y_s, C_s)/D_t^c(L_s, K_s, E_s, y_s, C_s)}$ 表示由时刻 t 到时刻 s 实际生产技术的理想产出和 CRS 假设下生产技术的理想产出比值的变化量,因此该项被称为规模效益调整因子^[12]。为获知劳动力-能源 (LE_t)、资本-能源比 (KE_t)、能源投入 (ES_t)、碳排放-能源比 (CE_t)、产出结构 (OS_t) 在实际生产技术条件下对能源生产力的影响,采用 Fisher 系数分解法把规模效益调整因子分解成劳动力规模效益调整因子 (SAFL_t)、资本规模效益调整因子 (SAFK_t)、能源投入规模效益调整因子 (SAFE_t)、碳排放规模效益调整因子 (SAFC_t)、产出结构规模效益调整因子 (SAFO_t)。

$$\begin{aligned} \text{令 } S^t(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t) &= D_t(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t)/D_t^c(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t) \\ \text{则 } \frac{S^t(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t)}{S^t(L_s, K_s, E_s, y_s, C_s)} &= \frac{D_t(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t)/D_t^c(L_t, K_t, E_t, y_t, C_t)}{D_t(L_s, K_s, E_s, y_s, C_s)/D_t^c(L_s, K_s, E_s, y_s, C_s)} \\ &= \text{SAFL}_t \times \text{SAFK}_t \times \text{SAFE}_t \times \text{SAFC}_t \times \text{SAFO}_t \quad (2-24) \end{aligned}$$

式(2-24)中的SAFL_t, SAFK_t, SAFE_t, SAFC_t, SAFO_t代数式如下:

$$\begin{aligned} \text{SAFL}_t &= \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/5} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_t)} \right)^{1/5} \\ &\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \\ &\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\ &\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\ &\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_t)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_t)} \right)^{1/20} \\ &\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \\ &\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \\ &\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_t)} \right)^{\frac{1}{30}} \quad (2-25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
SAFK_t &= \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/5} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_t)} \right)^{1/5} \\
&\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \\
&\times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
&\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
&\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_t)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_t)} \right)^{1/20} \\
&\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \\
&\times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \\
&\times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_t)} \right)^{1/30} \quad (2-26)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
SAFE_t &= \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/5} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_t)} \right)^{1/5} \\
&\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \\
&\times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
&\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
&\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_t)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_t)} \right)^{1/20} \\
&\times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_s)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/30}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_t)} \right)^{\frac{1}{30}} \quad (2-27)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
SAFO_t &= \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/5} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/5} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_t)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_s)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_t)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_t)} \right)^{\frac{1}{30}} \quad (2-28)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
SAFC_t &= \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/5} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/5} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/20}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_t, c_s)} \right)^{1/20} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_t, e_s, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_t, y_s, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_t, k_s, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \\
& \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_t, e_s, y_t, c_s)} \right)^{1/30} \times \left(\frac{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_t)}{D_t^c(l_s, k_s, e_t, y_t, c_s)} \right)^{\frac{1}{30}} \quad (2-29)
\end{aligned}$$

因此，实际生产技术下劳动力-能源比、资本-能源比、能源投入、产出结构、碳排放-能源比这五个因素对能源生产力的影响效果 $LE_t, KE_t, ES_t, CE_t, OS_t$ 分别为：

$$LE_t = SAFL_t \times LE_t^c \quad (2-30)$$

$$KE_t = SAFK_t \times KE_t^c \quad (2-31)$$

$$ES_t = SAF_t \times ES_t^c \quad (2-32)$$

$$CE_t = SAF C_t \times CE_t^c \quad (2-33)$$

$$OS_t = SAF_t \times O_t^c \quad (2-34)$$

综上所述，以 t 时刻的生产技术集合作为参考时，s 时刻和 t 时刻的能源生产力变化量可以分解成劳动力-能源比、资本-能源比、能源投入、产出结构、碳排放-能源比、技术效率、技术进步 7 个影响因素：

$$\frac{\bar{Y}_s/\bar{E}_s}{\bar{Y}_t/\bar{E}_t} = LE_t \times KE_t \times ES_t \times OS_t \times CE_t \times TEC \times TC(s) \quad (2-35)$$

相对应的，以 s 时刻的生产技术集合作为参考时，s 时刻和 t 时刻的能源生产力变化量因素分解形式为：

$$\frac{\bar{Y}_s/\bar{E}_s}{\bar{Y}_t/\bar{E}_t} = LE_s \times KE_s \times E_s \times O_s \times C_s \times TEC \times TC(t) \quad (2-36)$$

由式 (2-35) 和式 (2-36) 可见，在以不同时刻的生产技术集合作为参考研究两个时刻能源生产力变化量的影响因素时出现两组不同的影响因素，为了综合考虑两个不同时刻的生产技术，取这两组影响因素的几何平均值作为能源生产力变化量的最终影响因素，即：

$$\begin{aligned} \frac{\bar{Y}_s/\bar{E}_s}{\bar{Y}_t/\bar{E}_t} &= (LE_t \times LE_s)^{1/2} \times (KE_t \times KE_s)^{1/2} \times (ES_t \times ES_s)^{1/2} \times (O_t \times OS_s)^{1/2} \times (CE_t \times CE_s)^{1/2} \\ &\quad \times TEC \times (TC(s) \quad TC(t))^{1/2} \\ &= LE \times KE \times ES \times OS \times CE \times TEC \times TC \end{aligned} \quad (2-37)$$

式(2-37)表示能源生产力变化的影响因素有7个：劳动力-能源比(LE)，资本-能源比(KE)，能源投入(ES)，产出结构(OS)，碳排放-能源比(CE)，技术效率(TEC)，技术进步(TC)。影响因素的值如果大于1，说明在当前生产技术条件下该因素对能源生产力的提高起促进作用；如果小于1，则说明在当前生产技术条件下该因素对能源生产力起抑制作用；如果等于1，说明在当前生产技术条件下该影响因素对能源生产力既不抑制也不促进。例如，假设TC=1.10，那么在其它影响因素对能源生产力既没有促进作用也没有抑制作用时(其它影响因素都为1)，技术进步能使能源生产力提高10%，起促进作用；而如果TC=0.90，那么在其它影响因素对能源生产力既没有促进作用也没有抑制作用时(其它影响因素都为1)，技术进步会使源生产力下降10%，起抑制作用。需要注意的是，各影响因素对能源生产力变化的影响不是代数累加的效果，而是代数累积的效果。

2.5 小结

本章综述了国内外能源生产力相关发展现状，并对能效评价方法，特别是随机前沿法和数据包络法方面的研究进行了详细综述，同时还详细介绍了本研究所采用的分析方法。

第三章 基于 DEA 的工业能源生产力实证分析

越来越多的学者认为：中国工业的发展是伴随能源巨大消耗和环境严重污染的粗放式发展。为达到维持经济不断增长，同时又降低能源消耗的温室气体排放的目的，用基于全要素的能源生产力指标来准确度量工业的发展效率。若外部影响因素不加以考虑，工业生产率将被高估。因此，本章运用第二章的研究方法，基于产出的 Shephard 距离函数，利用 MATLAB 等软件求解 DEA 线性规划模型，对考虑非期望产出 CO₂ 的全要素能源生产力及其影响因素进行评估。

3.1 全国各地区工业能源生产力分析

3.1.1 数据处理

本报告在对中国工业领域能源生产力进行评价时，如第二章中的图 2-1 所示，所考虑的投入项包括能源、资本和劳动力，产出项包括期望产出——工业增加值、以及非期望产出——工业 CO₂ 排放。其中，产出用工业增加值替代，数据来源于中国统计年鉴。能源投入包括煤、石油、天然气，统一折算为标煤，数据主要来源于中国能源统计年鉴。资本投入用行业固定资产投资替代，数据来源于中国统计年鉴。劳动力投入为分行业就业人员数量表示，数据来源于中国统计年鉴。CO₂ 排放是根据一次能源消费量，用碳平衡法计算得到^[54]。为对比“十五”、“十一五”和“十二五”期间工业能源生产力的变化，此处各要素所考察的年份是选取 2005 年、2010 年和 2015 年为代表，其中，鉴于研究期间数据的可获得性，2015 年的数据由 2014 年的代替。对收集到的样本数据进行初步统计分析，结果见表 3-1。

表 3-1 投入产出统计数据样本

要素	单位	年份	几何平均值	标准偏差	最小值	最大值
工业增加值	亿元	2005	1816.6	2767.3	156.2	10482.0
		2010	4532.4	5646.8	417.0	21813.7
		2015	6005.5	7160.4	504.7	28397.6
CO ₂ 排放	万吨	2005	4339.4	3734.4	521.4	16825.6
		2010	5852.3	4733.2	815.5	21155.2
		2015	6386.4	4429.1	1313.3	21723.7
能源投入	万吨标煤	2005	1918.4	1605.7	238.9	7249.9
		2010	2606.6	2051.5	398.1	9147.5
		2015	2879.8	1942.4	721.0	9512.7

资本投入	亿元	2005	854.3	1192.8	127.1	5206.7
		2010	2743.9	3052.3	192.4	12947.0
		2015	4367.4	4990.6	332.9	19583.8
劳动力投入	万人	2005	159.3	207.1	14.8	808.7
		2010	184.3	299.9	16.8	1228.2
		2015	231.4	418.0	20.1	1620.3

3.1.2 能源生产力计算结果

工业生产活动中不可避免的会产出若干非期望产出。为了解这些非期望产出对工业发展有何影响，此处首先在不考虑非期望产出时，探讨中国在“十五”、“十一五”和“十二五”期间工业能源生产力发展情况。表 3-2 计算了这三个时期中国各省市工业能源生产力的值。其中，EP₂₀₀₅、EP₂₀₁₀、EP₂₀₁₅ 分别代表“十五”、“十一五”和“十二五”末年的能源生产力。“十五”期间，中国各地区能源生产力范围为 0.278~2.341 万元/吨标煤，“十一五”期间为 0.684~4.134 万元/吨标煤，“十二五”期间为 0.759~5.144 万元/吨标煤。从全国算术平均值来看，十五”、“十一五”和“十二五”期间的能源生产力分别为 1.071、1.896 和 2.366 万元/吨标煤。相较于“十五”，“十一五”的工业能源生产力是其 1.836 倍，“十二五”的工业能源生产力是其 2.358 倍。从各地区来看，这十五年中，宁夏地区的工业能源生产力一直处于全国最低，广东的工业能源生产力则最高。各地区能源生产力的差异反映了各地工业规模的大小、发展水平的高低。

表 3-2 分地区工业领域能源生产力计算结果对比

地区	能源生产力（万元/吨标煤）			EP ₂₀₁₀ /EP ₂₀₀₅	EP ₂₀₁₅ /EP ₂₀₀₅	EP ₂₀₁₅ /EP ₂₀₁₀
	EP ₂₀₀₅	EP ₂₀₁₀	EP ₂₀₁₅			
北京	1.509	2.700	4.415	1.789	2.926	1.635
天津	1.860	2.783	3.199	1.496	1.720	1.149
河北	0.953	1.915	2.068	2.008	2.169	1.080
山西	0.903	1.522	1.082	1.686	1.199	0.711
内蒙古	0.656	2.270	2.168	3.459	3.304	0.955
辽宁	1.068	1.746	2.170	1.635	2.032	1.243
吉林	0.711	1.336	2.054	1.877	2.888	1.538
黑龙江	1.237	1.591	1.330	1.287	1.075	0.836

上海	2.238	2.472	2.658	1.105	1.188	1.075
江苏	1.925	3.626	4.750	1.884	2.468	1.310
浙江	1.916	4.134	4.724	2.157	2.465	1.143
安徽	0.695	1.711	2.576	2.462	3.706	1.505
福建	1.455	2.201	3.172	1.513	2.181	1.441
江西	1.446	2.538	2.746	1.755	1.899	1.082
山东	1.320	2.130	2.527	1.614	1.915	1.186
河南	0.969	1.847	2.514	1.905	2.594	1.361
湖北	0.721	1.302	2.304	1.806	3.195	1.769
湖南	0.615	1.610	3.038	2.617	4.939	1.888
广东	2.341	3.228	5.144	1.379	2.197	1.594
广西	0.881	2.018	2.418	2.290	2.744	1.198
海南	0.538	0.879	0.700	1.635	1.301	0.796
重庆	0.741	1.381	2.110	1.864	2.847	1.527
四川	0.979	1.401	1.877	1.430	1.917	1.340
贵州	0.362	0.787	1.477	2.171	4.075	1.877
云南	0.784	1.300	1.608	1.657	2.049	1.237
陕西	0.941	1.887	2.209	2.005	2.346	1.170
甘肃	0.663	1.347	1.325	2.030	1.997	0.984
青海	0.854	1.528	1.045	1.791	1.224	0.684
宁夏	0.278	0.684	0.759	2.457	2.724	1.108
新疆	0.562	0.992	0.820	1.765	1.458	0.826
几何平均值	0.947	1.739	2.085	1.836	2.202	1.199
算数平均值	1.071	1.896	2.366	1.884	2.358	1.242

3.1.3 不考虑副产出 CO₂ 的影响因素分解结果

为简化计算和对比,此处在对能源生产力影响因素进行分解时将首先不考虑副产出 CO₂ 排放。此处采用 DEAP2.1 软件对中国各省区工业领域能源生产力进行分析,分解得到 Malmquist 全要素能源生产率指数、技术效率变化指数、技术进步指数、纯

技术效率变化指数和规模效率变化指数。Malmquist 指数最早是由瑞典经济学家和统计学家 Malmquist.S.于 1953 年提出，他当时主要用这一量化指标来分析不同时期的消费变化。随后，Caves 等人受 Malmquist 消费指数的启发，于 1982 年通过距离函数之比构造了生产率指数，即 Malmquist 生产率指数。有关技术效率、规模效率、生产效率、生产率的数学意义见附录一。

“十五”、“十一五”、“十二五”这三个时期的平均值结果见表 3-3。整体来看，中国工业领域全要素能源生产率指数年均增长 37%，这主要得益于技术进步，技术进步的年均增长率高达 34%，技术效率变化、纯技术变化和规模效率变化对全要素能源生产率指数的贡献较小，分别是 2.2%、1.2%和 1.0%。从地区来看，各个地区的技术进步都对全要素能源生产率带来正面的影响，而技术效率变化、纯技术效率变化和规模效率变化对不同地区的影响也不一样。例如，对技术效率变化而言，天津、内蒙古、辽宁、吉林、江苏、安徽等地的贡献是正面的，而对河北、山西、黑龙江、山东、河南、云南、甘肃、新疆等地的贡献是负面的。再如，从规模效率来看，天津、吉林、江西、青海、宁夏、海南等地的全要素能源生产率受益于规模效率，而河北、辽宁、四川等地并没有从规模效率变化中显著受益。

表 3-3 不考虑副产出的基于 Malmquist 指数的影响因素分解结果

地区	技术效率	技术进步	纯技术效率	规模效率	全要素能源生产率
北京	1.000	1.255	1.000	1.000	1.255
天津	1.079	1.363	1.046	1.031	1.470
河北	0.983	1.361	0.994	0.989	1.337
山西	0.869	1.291	0.865	1.004	1.122
内蒙古	1.062	1.505	1.038	1.023	1.599
辽宁	1.093	1.373	1.115	0.979	1.500
吉林	1.083	1.415	1.061	1.021	1.533
黑龙江	0.809	1.298	0.817	0.990	1.050
上海	1.000	1.172	1.000	1.000	1.172
江苏	1.103	1.472	1.101	1.002	1.624
浙江	1.059	1.402	1.059	1.001	1.485
安徽	1.158	1.405	1.121	1.033	1.627

福建	1.005	1.260	1.020	0.985	1.266
江西	0.967	1.427	0.939	1.029	1.379
山东	0.941	1.376	0.983	0.957	1.294
河南	0.849	1.448	0.860	0.987	1.229
湖北	1.042	1.327	1.032	1.009	1.383
湖南	1.116	1.393	1.105	1.010	1.554
广东	1.000	1.238	1.000	1.000	1.238
广西	1.114	1.366	1.107	1.007	1.522
海南	1.066	1.306	1.000	1.066	1.391
重庆	1.095	1.348	1.068	1.025	1.476
四川	1.161	1.331	1.238	0.938	1.546
贵州	1.154	1.292	1.096	1.053	1.491
云南	0.937	1.291	0.920	1.018	1.209
陕西	1.137	1.271	1.094	1.039	1.445
甘肃	0.963	1.292	0.936	1.029	1.244
青海	1.051	1.311	1.000	1.051	1.378
宁夏	1.081	1.331	1.046	1.033	1.439
新疆	0.837	1.330	0.831	1.006	1.113
几何平均值	1.022	1.340	1.012	1.010	1.370

3.1.4 考虑副产出 CO₂ 时的能源生产力分析

(1) 不同生产条件假设下的工业生产效率对比

企业在发展过程中，随着生产规模的逐渐增大，其规模效益一般是从规模效益增大到规模效益不变，再到规模效益减小。因此，DEA 法计算生产效率的技术条件时有规模效益可变（VRS）和规模效益不变（CRS）两种。CRS 假设意味着该生产决策单元规模效益不变，即规模效益总是处于最佳状态，这显然是个理想化的假设。实际生产活动中，不同的生产决策单元有可能处于规模效益增大、规模效益不变和规模效益减小中的任何一种状态，因此，本报告在对比 CRS 和 VRS 两种假设的同时，最终将采用与实际生产活动更加符合的 VRS 作为估算工业生产效率的生产技术条件。在

处理非期望产出时，此处将 CO₂ 当作投入，采用基于产出的 Shephard 距离函数计算并比较了 VRS 和 CRS 两种不同假设下全国各省市在“十五”、“十一五”和“十二五”期间工业生产效率变化。结果见表 3-4。

表 3-4 全国各省市工业不同生产条件假设下的生产效率

地区	CRS			VRS		
	2005 年	2010 年	2015 年	2005 年	2010 年	2015 年
北京	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
天津	0.86	1.00	1.00	0.90	1.00	1.00
河北	0.80	0.82	0.78	0.83	0.95	1.00
山西	0.66	0.74	0.50	0.66	0.74	0.55
内蒙古	0.89	1.00	1.00	0.92	1.00	1.00
辽宁	0.63	0.69	0.75	0.64	0.82	0.97
吉林	0.67	0.62	0.78	0.68	0.63	0.81
黑龙江	0.94	0.79	0.62	0.95	0.79	0.62
上海	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
江苏	0.82	0.99	0.92	0.89	1.00	0.92
浙江	0.82	1.00	0.92	0.83	1.00	0.93
安徽	0.50	0.67	0.78	0.51	0.70	0.83
福建	0.77	0.70	0.86	0.80	0.71	0.89
江西	0.62	0.78	0.73	0.70	0.81	0.74
山东	0.78	0.80	0.76	0.91	1.00	1.00
河南	0.89	0.82	0.74	0.91	1.00	0.90
湖北	0.57	0.76	0.69	0.58	0.77	0.80
湖南	0.70	0.83	0.94	0.70	0.84	1.00
广东	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
广西	0.64	0.81	0.83	0.66	0.82	0.83
海南	0.61	0.85	0.69	1.00	1.00	1.00
重庆	0.54	0.84	0.66	0.56	0.85	0.68
四川	0.58	0.75	0.79	0.59	0.78	1.00

贵州	0.53	0.60	0.70	0.56	0.61	0.72
云南	0.69	0.61	0.60	0.71	0.61	0.60
陕西	0.64	0.78	0.83	0.66	0.78	0.90
甘肃	0.55	0.67	0.51	0.66	0.68	0.54
青海	0.60	0.72	0.67	1.00	1.00	1.00
宁夏	0.47	0.53	0.56	0.59	0.56	0.65
新疆	0.82	0.77	0.58	0.88	0.78	0.59
平均值	0.72	0.80	0.77	0.78	0.84	0.85

从表 3-4 可知，CRS 假设下，2005 年仅有北京、上海、广东 3 个省处于生产前沿面上，生产效率达到 1，其余省市生产效率都小于 1，即实际产出小于理想产出。例如，天津在 2005 年的生产效率是 0.86，表示天津 2005 年的工业总产值仅达到理想产值的 86%。2010 年位于生产前沿面的省市有北京、天津、内蒙古、上海、浙江、广东，增加到了 6 个。2015 年位于生产前沿面上的省市有包括北京、天津、内蒙古、上海、广东在内的 5 个地区。对比全国平均生产效率可以发现，2005 年全国平均效率为 0.72，2010 年全国平均效率提升显著，达到了 0.80，但到 2015 年效率略微下降至 0.77。这主要是因为“十五”期间中国经济保持高速增长，尽管经历了 2008 年的全球金融危机，但是中国政府实行了强有力的经济刺激政策，到 2010 年中国经济仍然保持较快的发展，这期间工业生产效率仍然在提高。2015 年中国经济进入到前几年的经济刺激方案的消化期，加上全球经济复苏缓慢，中国经济增速下降明显，工业生产效率提升困难甚至有所下降，经济结构急需转型。

表 3-4 的结果可以看出，各地区 VRS 假设下的总体生产效率趋势与 CRS 假设类似。VRS 假设下的生产效率应该大于或等于 CRS 假设下的生产效率。这是因为 CRS 是计算生产决策单元时在规模效益问题上的理想化假设，该假设认为生产决策单元都处于生产规模效益最大的状态。以企业为代表的生产决策单元在发展过程中生产规模效益会出现三种可能的状态：规模效益增大，规模效益不变和规模效益减小。显然在实际生产活动中生产决策单元不是处于生产规模效益最大的状态的可能性更大，并且 VRS 假设即表示规模效益有可能是三种状态中的任何一种。

图 3-1~图 3-3 进一步比较了全国各省市工业在 VRS 和 CRS 不同假设下的生产效率。通过对比表 3-4 和图 3-1 至图 3-3，可以发现本报告对 2005、2010、2015 三年

全国各省市工业能源生产力的计算结果完全验证了“CRS 假设下的生产效率小于或等于 VRS 假设下的生产效率”的结论。由于 CRS 对规模效益的理想化假设没有考虑到生产规模增大过程中会遇到的内外部限制, 从而造成对理想产出的高估——表现为生产效率的降低。VRS 假设下 2005、2010、2015 年的全国平均工业生产效率分别为 0.78、0.84、0.85, CRS 假设下 2005、2010、2015 年的全国平均工业生产效率分别为 0.72、0.80、0.77。可见 CRS 假设下的全国平均工业生产效率低于 VRS 假设下的全国平均工业生产效率。

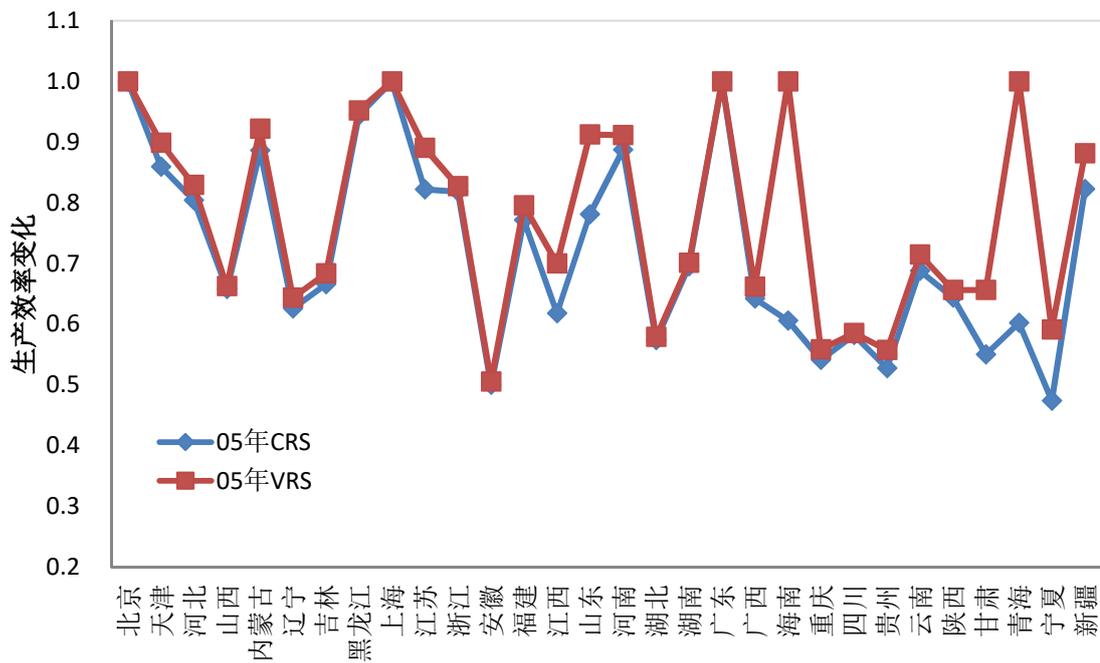


图 3-1 2005 年各省市工业生产效率 VRS 和 CRS 比较

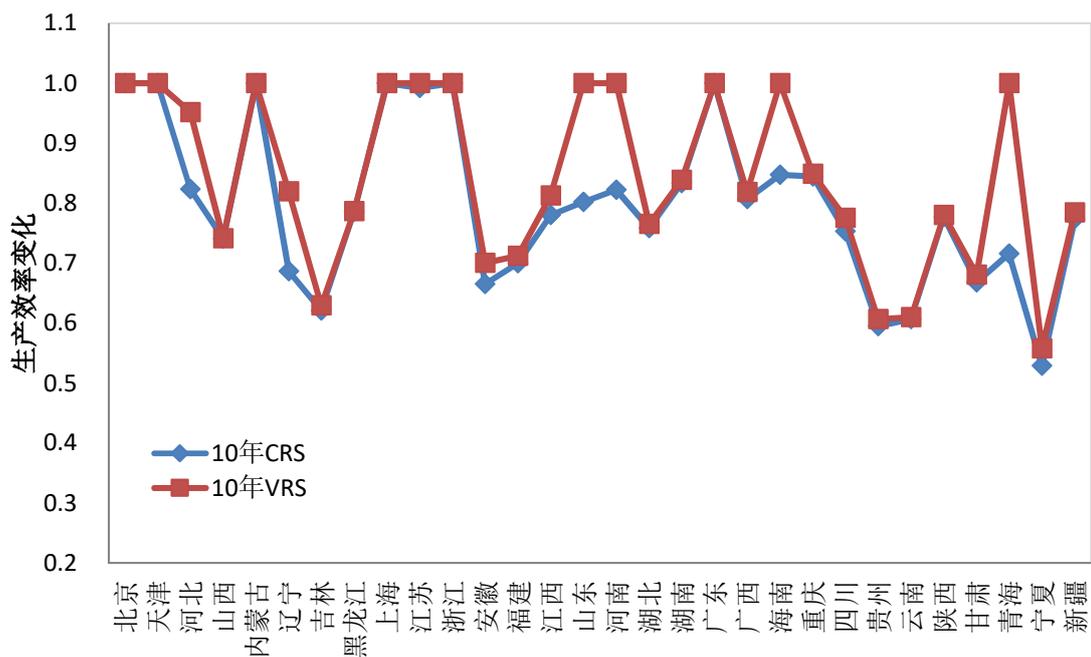


图 3-2 2010 年各省市工业生产效率 VRS 和 CRS 比较

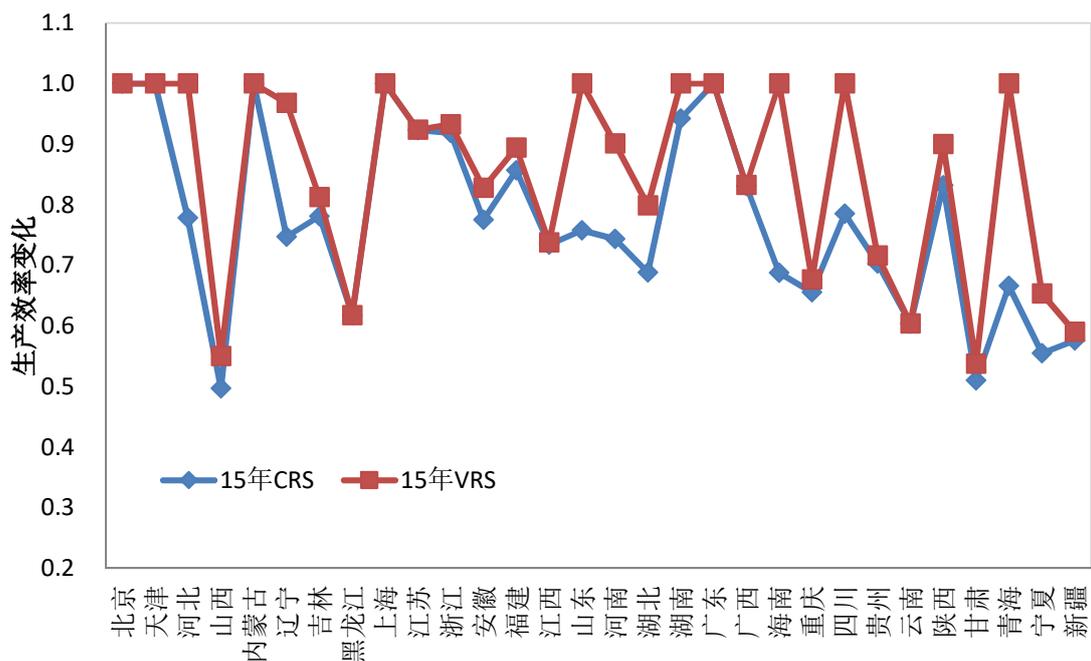


图 3-3 2015 年各省市工业生产效率 VRS 和 CRS 比较

(2) 不同生产条件假设下的工业能源生产力影响因素对比

影响能源生产力的因素有多种，包括技术创新、开发和应用、资源分配结构、工业结构和制度安排、管理和机制、补贴、价格和税收水平、需求偏好（由价格、基础设施、制度安排、文化习俗等决定）等^[11]。研究发现各地区全要素能源效率与当地人均收入存在 U 型关系，表明能源效率最终会促进经济增长^[44]。产业结构也影响能源

生产力结果。例如，某地区第二产业的比例增加，会使该地区的全要素能源生产力指数恶化^[49]。此处在上小结 CRS 和 VRS 假设下的工业生产效率对比的基础上，进一步对 CRS 和 VRS 假设下的工业能源生产力影响因素进行比较。能源生产力变化将被分解成劳动力-能源比 (LE)、资本-能源比 (KE)、能源投入 (ES)、产出结构 (OS)、碳排放-能源比 (CE)、技术进步 (TC) 和技术效率变化 (TEC) 7 个影响因素。结果见表 3-5 和表 3-6。

对比 CRS 和 VRS 不同生产条件假设结果可知，中国不同地区能源生产力的影响因素存在显著差异。各地区 LE、KE、OS 三个影响因素几乎都不受 CRS 和 VRS 假设条件的限制，而 ES、CE、TEC 和 TC 则显示出不同的结果。不论在 VRS 还是在 CRS 的条件下，产出结构 OS 的值均为 1，这主要是因为本研究所考察的产出仅工业增加值一种。以北京地区为例，VRS 假设下，影响因素 LE、KE、ES、OS、CE、TEC 和 TC 的值分别为 1.02、1.12、1.16、1.00、0.92、1.00、1.21。可见，当 CO₂ 作为投入时，碳排放-能源比 (CE) 对能源生产力提高是限制作用，技术进步 (TC) 是能源生产力提高主要动力来源，资本-能源比 (KE) 和能源投入 (ES) 对能源生产力的提高也有重要贡献，劳动力-能源比 (LE)、产出结构 (OS) 和技术效率 (TEC) 对能源生产力提高的促进作用较小。

表 3-5 不同生产条件假设下 2005-2010 年工业能源生产力影响因素分解

地区	CRS							VRS						
	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC
北京	1.00	1.31	1.09	1.00	0.99	1.00	1.27	1.00	1.31	1.08	1.00	0.98	1.00	1.23
天津	1.01	1.13	0.65	1.00	1.06	1.16	1.62	1.01	1.13	0.68	1.00	1.08	1.11	1.60
河北	0.96	1.24	0.94	1.00	1.00	1.02	1.75	0.96	1.24	0.94	1.00	1.00	1.15	1.67
山西	1.10	1.13	0.77	1.00	1.00	1.13	1.56	1.10	1.13	0.77	1.00	1.00	1.12	1.57
内蒙古	1.01	1.31	0.91	1.00	1.01	1.13	2.52	1.01	1.31	0.91	1.00	1.01	1.08	2.60
辽宁	1.06	1.15	0.67	1.00	1.05	1.10	1.74	1.06	1.15	0.65	1.00	1.02	1.27	1.64
吉林	1.05	1.33	0.67	1.00	1.04	0.93	2.06	1.05	1.33	0.67	1.00	1.03	0.92	2.08
黑龙江	0.92	1.40	0.77	1.00	1.00	0.83	1.56	0.93	1.40	0.77	1.00	1.00	0.83	1.54
上海	1.06	1.10	0.72	1.00	1.04	1.00	1.28	1.04	1.10	0.72	1.00	1.05	1.00	1.29
江苏	1.03	1.04	0.93	1.00	1.05	1.21	1.49	1.03	1.04	0.90	1.00	1.02	1.12	1.72

浙江	1.04	1.07	1.02	1.00	0.99	1.22	1.58	1.04	1.07	1.01	1.00	0.99	1.21	1.59
安徽	1.02	1.33	0.81	1.00	1.01	1.33	1.67	1.02	1.33	0.80	1.00	1.01	1.39	1.63
福建	1.07	1.43	0.73	1.00	1.09	0.91	1.37	1.07	1.43	0.73	1.00	1.09	0.89	1.35
江西	1.09	1.12	0.69	1.00	1.18	1.26	1.39	1.08	1.12	0.74	1.00	1.22	1.16	1.38
山东	1.08	1.09	0.81	1.00	1.01	1.03	1.63	1.04	1.09	0.79	1.00	1.00	1.10	1.77
河南	1.17	1.27	0.78	1.00	1.01	0.93	1.76	1.16	1.27	0.77	1.00	1.01	1.10	1.65
湖北	1.05	1.31	0.65	1.00	1.00	1.32	1.52	1.04	1.31	0.65	1.00	1.00	1.32	1.51
湖南	1.12	1.29	0.90	1.00	1.00	1.20	1.67	1.13	1.29	0.90	1.00	1.00	1.20	1.65
广东	1.10	1.11	0.74	1.00	1.13	1.00	1.35	1.05	1.11	0.69	1.00	1.05	1.00	1.60
广西	1.15	1.28	0.73	1.00	1.02	1.26	1.67	1.16	1.28	0.73	1.00	1.02	1.24	1.65
海南	1.11	1.07	0.61	1.00	1.00	1.40	1.61	1.00	1.07	0.58	1.00	0.95	1.00	2.75
重庆	1.11	1.26	0.52	1.00	1.01	1.56	1.62	1.11	1.26	0.53	1.00	1.02	1.52	1.60
四川	1.14	1.14	0.50	1.00	1.04	1.29	1.64	1.13	1.14	0.50	1.00	1.04	1.33	1.63
贵州	1.02	1.15	1.05	1.00	1.00	1.13	1.57	1.02	1.15	1.05	1.00	1.00	1.09	1.56
云南	1.38	1.20	0.72	1.00	1.00	0.88	1.57	1.37	1.20	0.73	1.00	1.01	0.85	1.59
陕西	1.04	1.45	0.71	1.00	1.02	1.21	1.52	1.04	1.45	0.72	1.00	1.02	1.19	1.54
甘肃	0.97	1.32	0.83	1.00	1.00	1.21	1.58	0.97	1.32	0.84	1.00	1.01	1.04	1.59
青海	1.18	1.14	0.62	1.00	1.03	1.19	1.76	1.03	1.14	0.67	1.00	1.04	1.00	2.38
宁夏	1.10	1.28	0.85	1.00	1.00	1.12	1.84	1.10	1.28	0.85	1.00	1.00	0.94	1.84
新疆	1.11	1.26	0.73	1.00	1.00	0.94	1.84	1.12	1.26	0.73	1.00	1.00	0.89	1.91

表 3-6 不同生产假设下 2010-2015 年工业能源生产力影响因素分解

地区	CRS							VRS						
	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC
北京	1.01	1.12	1.20	1.00	0.94	1.00	1.28	1.02	1.12	1.16	1.00	0.92	1.00	1.21
天津	1.11	1.01	0.83	1.00	1.07	1.00	1.15	1.13	1.01	0.84	1.00	1.07	1.00	1.11
河北	1.05	1.12	0.91	1.00	1.01	0.94	1.06	1.05	1.12	0.89	1.00	1.00	1.05	1.04
山西	1.11	1.23	0.73	1.00	1.00	0.67	1.07	1.09	1.23	0.73	1.00	1.00	0.74	1.02
内蒙古	1.18	1.10	0.78	1.00	1.05	1.00	0.90	1.17	1.10	0.77	1.00	1.03	1.00	0.97
辽宁	1.05	1.05	0.95	1.00	1.01	1.09	1.08	1.04	1.05	0.94	1.00	1.00	1.18	1.03

吉林	1.18	1.07	1.00	1.00	1.00	1.26	0.97	1.18	1.07	1.00	1.00	1.00	1.29	0.97
黑龙江	1.00	1.04	0.95	1.00	1.00	0.79	1.08	1.00	1.04	0.95	1.00	1.00	0.79	1.08
上海	1.12	0.90	0.99	1.00	1.00	1.00	1.07	1.08	0.90	0.99	1.00	1.00	1.00	1.13
江苏	1.11	1.00	1.01	1.00	0.99	0.93	1.27	1.08	1.00	1.02	1.00	0.99	0.92	1.31
浙江	1.00	1.00	0.96	1.00	1.03	0.92	1.25	1.00	1.00	0.96	1.00	1.02	0.93	1.24
安徽	1.17	1.02	0.98	1.00	1.00	1.16	1.10	1.19	1.02	0.97	1.00	1.00	1.18	1.06
福建	1.05	1.05	0.95	1.00	1.01	1.22	1.11	1.05	1.05	0.95	1.00	1.01	1.26	1.05
江西	1.06	1.00	0.88	1.00	1.06	0.94	1.16	1.06	1.00	0.89	1.00	1.06	0.91	1.20
山东	1.06	1.09	0.98	1.00	1.00	0.94	1.11	1.10	1.09	0.96	1.00	1.00	1.00	1.03
河南	1.19	1.05	1.10	1.00	0.99	0.90	1.10	1.26	1.05	1.12	1.00	0.99	0.90	1.02
湖北	1.25	1.27	1.12	1.00	0.99	0.91	1.11	1.28	1.27	1.15	1.00	1.00	1.04	1.01
湖南	1.12	1.16	1.17	1.00	0.99	1.13	1.12	1.12	1.16	1.20	1.00	1.00	1.19	1.07
广东	1.17	1.09	1.16	1.00	0.95	1.00	1.15	1.14	1.09	1.18	1.00	0.96	1.00	1.10
广西	1.06	1.10	0.90	1.00	1.01	1.03	1.10	1.06	1.10	0.90	1.00	1.01	1.02	1.11
海南	1.11	1.27	0.66	1.00	1.00	0.81	1.06	1.12	1.27	0.65	1.00	0.94	1.00	1.06
重庆	1.26	1.23	1.14	1.00	1.00	0.78	1.12	1.25	1.23	1.14	1.00	1.00	0.80	1.10
四川	1.16	1.14	0.89	1.00	1.00	1.04	1.08	1.15	1.14	0.89	1.00	1.00	1.29	0.95
贵州	1.28	1.21	0.97	1.00	1.00	1.18	1.06	1.31	1.21	0.97	1.00	1.00	1.18	1.04
云南	1.09	1.16	0.92	1.00	1.00	1.00	1.06	1.10	1.16	0.92	1.00	1.00	0.99	1.06
陕西	1.06	1.20	0.78	1.00	1.03	1.07	1.06	1.06	1.20	0.77	1.00	1.03	1.15	1.03
甘肃	1.14	1.24	0.85	1.00	1.02	0.76	1.06	1.14	1.24	0.87	1.00	1.03	0.79	1.03
青海	1.04	1.24	0.54	1.00	1.09	0.93	0.98	1.04	1.24	0.59	1.00	1.21	1.00	0.88
宁夏	1.05	1.26	0.83	1.00	1.00	1.05	0.96	1.09	1.26	0.84	1.00	1.00	1.17	0.87
新疆	1.16	1.37	0.73	1.00	1.00	0.74	0.96	1.18	1.37	0.73	1.00	1.00	0.75	0.93

从各地的平均值结果来看，如表 3-7 和表 3-8 所示，采用不同规模效益的假设对 KE、ES、OS 这几个生产要素几乎没有影响，对 LE 的影响较小，但对 TEC 和 TC 的影响明显。2005-2010 年的数据中，VRS 假设下的 TEC 比 CRS 假设下的小，VRS 假设下的 TC 比 CRS 假设下的大，说明这段时间的实际生产活动中技术效率进步对能源生产力增长的贡献比理想规模效益下的小，而技术进步对能源生产力增长的贡献比

理想规模效益下的大。对比 2010-2015 年的数据可知，这期间实际生产活动中技术效率进步对能源生产力增长的贡献比理想规模效益下的大，而技术进步对能源生产力增长的贡献比理想规模效益下的小。

表 3-7 2005-2010 年 CRS 和 VRS 假设下的影响因素平均值比较

生产条件	EP ₂₀₀₅	EP ₂₀₁₀	EP ₂₀₁₀ /EP ₂₀₀₅	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC
CRS 假设	1.07	1.90	1.77	1.07	1.22	0.77	1.00	1.03	1.13	1.63
VRS 假设	1.07	1.90	1.77	1.06	1.22	0.77	1.00	1.02	1.10	1.70

表 3-8 2010-2015 年 CRS 和 VRS 假设下的影响因素平均值比较

生产条件	EP ₂₀₁₀	EP ₂₀₁₅	EP ₂₀₁₅ /EP ₂₀₁₀	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC
CRS 假设	1.90	2.37	1.25	1.11	1.13	0.93	1.00	1.01	0.97	1.09
VRS 假设	1.90	2.37	1.25	1.12	1.13	0.93	1.00	1.01	1.02	1.06

综上所述可以看出，CRS 和 VRS 不同假设下的工业能源生产力和其影响因素均存在不同程度的差异。为了与实际生产活动更符合，后续将采用 VRS 假设对工业能源生产力评价方法作进一步的探索。

(3) VRS 假设下 CO₂ 不同处理方式的工业生产效率比较

诸多有关 CO₂ 作为非期望产出的研究中，CO₂ 被当作一种投入来处理，目的在于尽可能增大产出，减少投入和副产出。但值得注意的是，非期望产出和期望产出之间往往存在弱可处置性，投入和产出之间却不一定有这样的关系。因此，本节将在 VRS 假设下，讨论 CO₂ 作为投入和副产出两种不同处理方式时中国工业生产效率和能源生产力影响因素的差异。结果见图 3-4~图 3-6 所示。CO₂ 作为副产出处理时，工业生产效率值都大于或等于 CO₂ 作为投入处理时的工业生产效率值。对于各省市工业生产效率的平均值而已，CO₂ 作为投入时，2005、2010、2015 年的值分别是 0.78、0.84、0.85，CO₂ 作为副产出时，2005、2010、2015 年的值分别是 0.93、0.96、0.95，各省市工业生产效率的算术平均值也证实上述结论。由于 CO₂ 作为副产出和期望产出之间存在着弱可处置性，这就意味着在相同投入和一定 CO₂ 排放量的情况下，通过提高生产效率促使期望产出增加的幅度还受到副产出量的限制，而当 CO₂ 作为投入处理时就不存在这一限制，这就是 VRS 假设下 CO₂ 作为副产出处理的工业生产效率高于 CRS 假设下的工业生产效率值的原因。

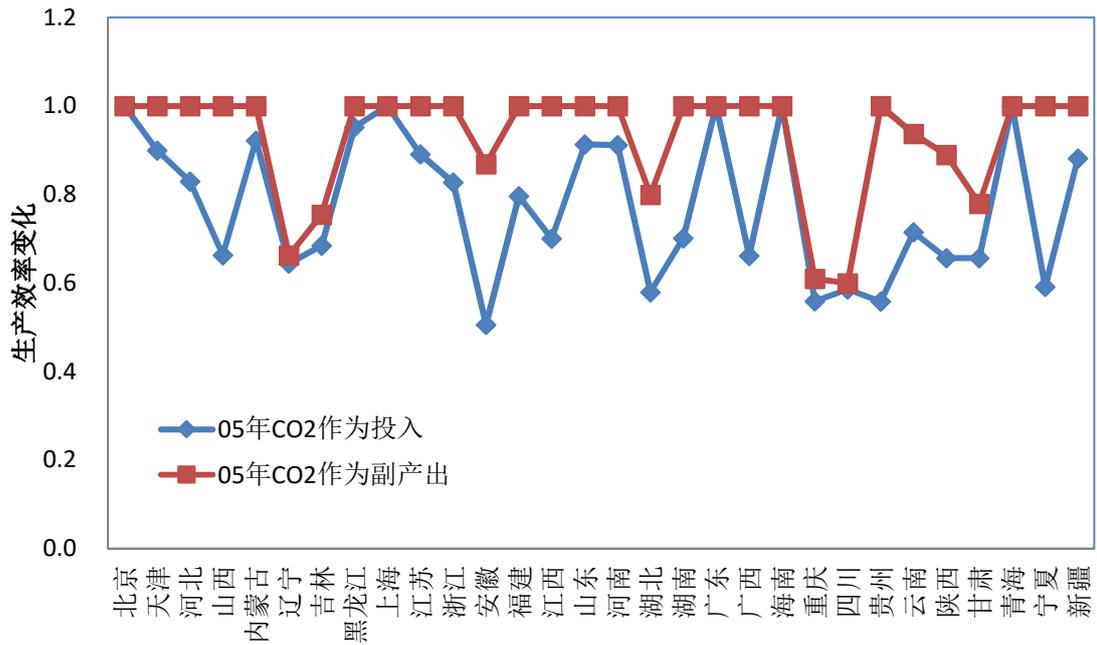


图 3-4 VRS 假设下 2005 年各省市 CO₂ 不同处理方式的工业生产效率比较

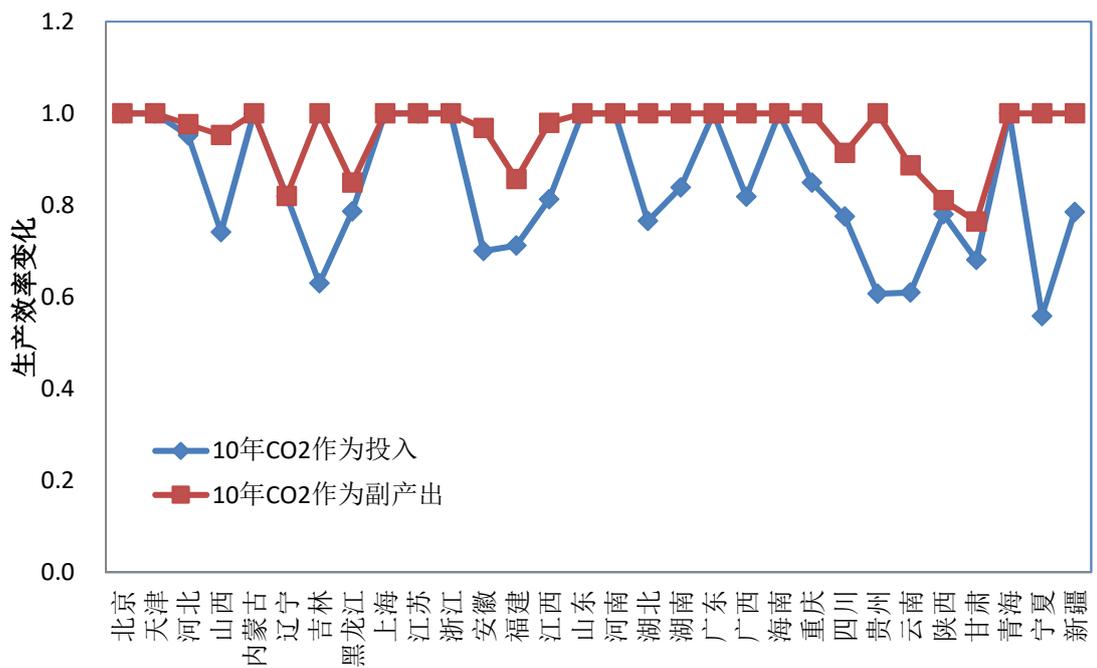


图 3-5 VRS 假设下 2010 年各省市 CO₂ 不同处理方式的工业生产效率比较

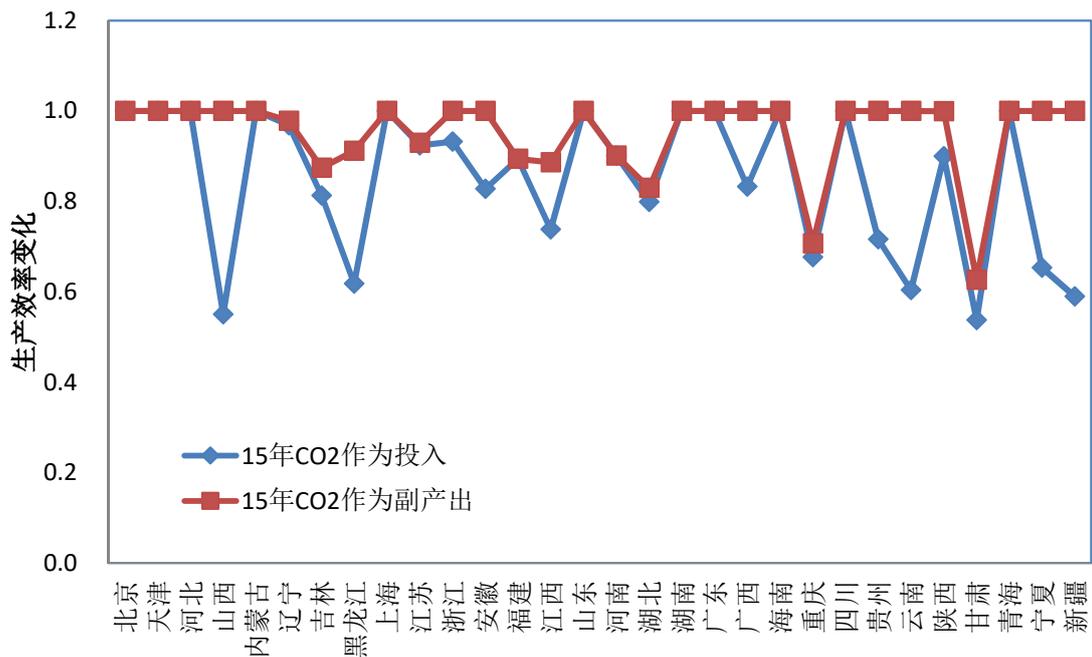


图 3-6 VRS 假设下 2015 年各省市 CO₂ 不同处理方式的工业生产效率比较

(4) VRS 假设下 CO₂ 不同处理方式的工业能源生产力影响因素分析

表 3-9 和表 3-10 是 VRS 假设下 2005-2010 年和 2010-2015 年 CO₂ 不同处理方式时全国各省市工业领域能源生产力影响因素分解结果。以北京为例，不论是“十一五”还是“十二五”期间，CO₂ 作为副产出处理时的各项分解因素结果均大于 CO₂ 作为投入处理时的结果。这说明，当 CO₂ 作为投入处理时，相比作为副产出处理时对结果存在一定的低估。

表 3-9 2005-2010 年 VRS 假设下 CO₂ 不同处理方式的工业能源生产力影响因素

地区	CO ₂ 作为副产出							CO ₂ 作为投入						
	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC
北京	1.01	1.07	0.88	1.00	1.15	1.00	1.69	1.00	1.31	1.08	1.00	0.98	1.00	1.23
天津	1.15	1.21	0.45	1.00	2.27	1.00	1.02	1.01	1.13	0.68	1.00	1.08	1.11	1.60
河北	0.97	1.26	1.00	1.00	1.09	0.98	2.18	0.96	1.24	0.94	1.00	1.00	1.15	1.67
山西	1.03	1.21	0.42	1.00	2.60	0.95	1.51	1.10	1.13	0.77	1.00	1.00	1.12	1.57
内蒙古	0.98	1.34	0.55	1.00	1.81	1.00	2.94	1.01	1.31	0.91	1.00	1.01	1.08	2.60
辽宁	1.04	1.32	0.28	1.00	2.74	1.24	1.58	1.06	1.15	0.65	1.00	1.02	1.27	1.64
吉林	1.07	1.28	0.22	1.00	3.03	1.33	1.97	1.05	1.33	0.67	1.00	1.03	0.92	2.08
黑龙江	0.91	1.22	0.38	1.00	1.99	0.85	1.90	0.93	1.40	0.77	1.00	1.00	0.83	1.54
上海	1.05	1.17	0.38	1.00	2.11	1.00	1.25	1.04	1.10	0.72	1.00	1.05	1.00	1.29

江苏	1.03	1.10	0.77	1.00	1.28	1.00	1.69	1.03	1.04	0.90	1.00	1.02	1.12	1.72
浙江	1.03	1.17	0.84	1.00	1.43	1.00	1.50	1.04	1.07	1.01	1.00	0.99	1.21	1.59
安徽	1.01	1.45	0.40	1.00	2.37	1.11	2.13	1.02	1.33	0.80	1.00	1.01	1.39	1.63
福建	1.05	1.48	0.36	1.00	2.97	0.86	1.23	1.07	1.43	0.73	1.00	1.09	0.89	1.35
江西	1.02	1.23	0.30	1.00	3.62	0.98	1.57	1.08	1.12	0.74	1.00	1.22	1.16	1.38
山东	1.00	1.49	0.44	1.00	2.07	1.00	1.76	1.04	1.09	0.79	1.00	1.00	1.10	1.77
河南	1.01	1.24	0.39	1.00	2.39	1.00	2.03	1.16	1.27	0.77	1.00	1.01	1.10	1.65
湖北	1.00	1.25	0.25	1.00	3.18	1.25	1.91	1.04	1.31	0.65	1.00	1.00	1.32	1.51
湖南	1.09	1.12	0.54	1.00	1.63	1.00	2.89	1.13	1.29	0.90	1.00	1.00	1.20	1.65
广东	1.06	1.11	0.34	1.00	2.22	1.00	1.62	1.05	1.11	0.69	1.00	1.05	1.00	1.60
广西	1.04	1.22	0.37	1.00	3.00	1.00	1.66	1.16	1.28	0.73	1.00	1.02	1.24	1.65
海南	1.07	0.94	0.26	1.00	2.18	1.00	3.05	1.00	1.07	0.58	1.00	0.95	1.00	2.75
重庆	1.17	1.31	0.18	1.00	2.39	1.64	1.78	1.11	1.26	0.53	1.00	1.02	1.52	1.60
四川	1.10	1.24	0.16	1.00	3.58	1.52	1.57	1.13	1.14	0.50	1.00	1.04	1.33	1.63
贵州	1.05	0.80	1.46	1.00	0.65	1.00	2.72	1.02	1.15	1.05	1.00	1.00	1.09	1.56
云南	1.26	1.05	0.26	1.00	3.10	0.95	1.41	1.37	1.20	0.73	1.00	1.01	0.85	1.59
陕西	0.98	1.16	0.35	1.00	2.59	0.91	2.11	1.04	1.45	0.72	1.00	1.02	1.19	1.54
甘肃	0.97	1.49	0.52	1.00	1.52	0.98	2.02	0.97	1.32	0.84	1.00	1.01	1.04	1.59
青海	0.99	1.08	0.22	1.00	2.45	1.00	2.70	1.03	1.14	0.67	1.00	1.04	1.00	2.38
宁夏	0.88	0.90	0.40	1.00	1.94	1.00	3.45	1.10	1.28	0.85	1.00	1.00	0.94	1.84
新疆	0.88	1.01	0.26	1.00	2.72	1.00	2.84	1.12	1.26	0.73	1.00	1.00	0.89	1.91

表 3-10 2010-2015 年 VRS 假设下 CO₂ 不同处理方式的工业能源生产力影响因素

地区	CO ₂ 作为副产出							CO ₂ 作为投入						
	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC
北京	0.99	1.09	1.06	1.00	0.86	1.00	1.48	1.02	1.12	1.16	1.00	0.92	1.00	1.21
天津	1.05	0.91	0.62	1.00	1.58	1.00	1.09	1.13	1.01	0.84	1.00	1.07	1.00	1.11
河北	1.03	1.18	0.56	1.00	1.74	1.02	0.96	1.05	1.12	0.89	1.00	1.00	1.05	1.04
山西	1.06	1.24	0.31	1.00	2.47	1.05	0.74	1.09	1.23	0.73	1.00	1.00	0.74	1.02
内蒙古	1.04	1.17	0.34	1.00	2.33	1.00	1.01	1.17	1.10	0.77	1.00	1.03	1.00	0.97

辽宁	1.04	1.07	1.02	1.00	0.93	1.19	1.00	1.04	1.05	0.94	1.00	1.00	1.18	1.03
吉林	1.34	1.06	1.00	1.00	1.11	0.87	1.07	1.18	1.07	1.00	1.00	1.00	1.29	0.97
黑龙江	0.99	1.05	0.99	1.00	0.90	1.07	0.82	1.00	1.04	0.95	1.00	1.00	0.79	1.08
上海	1.08	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93	1.08	0.90	0.99	1.00	1.00	1.00	1.13
江苏	1.04	1.00	0.81	1.00	1.34	0.93	1.24	1.08	1.00	1.02	1.00	0.99	0.92	1.31
浙江	1.01	1.03	1.21	1.00	0.88	1.00	1.04	1.00	1.00	0.96	1.00	1.02	0.93	1.24
安徽	1.08	1.07	1.00	1.00	1.12	1.03	1.14	1.19	1.02	0.97	1.00	1.00	1.18	1.06
福建	1.03	1.15	1.19	1.00	1.00	1.04	0.93	1.05	1.05	0.95	1.00	1.01	1.26	1.05
江西	1.07	1.00	0.84	1.00	1.74	0.91	0.81	1.06	1.00	0.89	1.00	1.06	0.91	1.20
山东	0.99	1.14	1.02	1.00	0.99	1.00	1.14	1.10	1.09	0.96	1.00	1.00	1.00	1.03
河南	1.00	1.06	1.66	1.00	0.83	0.90	1.06	1.26	1.05	1.12	1.00	0.99	0.90	1.02
湖北	1.16	1.18	2.15	1.00	0.59	0.83	1.15	1.28	1.27	1.15	1.00	1.00	1.04	1.01
湖南	1.10	1.15	2.44	1.00	0.59	1.00	1.05	1.12	1.16	1.20	1.00	1.00	1.19	1.07
广东	1.09	1.15	1.91	1.00	0.65	1.00	0.88	1.14	1.09	1.18	1.00	0.96	1.00	1.10
广西	1.02	1.13	0.68	1.00	1.61	1.00	1.03	1.06	1.10	0.90	1.00	1.01	1.02	1.11
海南	1.17	1.00	0.28	1.00	1.42	1.00	1.99	1.12	1.27	0.65	1.00	0.94	1.00	1.06
重庆	1.29	1.32	1.76	1.00	0.77	0.71	0.95	1.25	1.23	1.14	1.00	1.00	0.80	1.10
四川	1.14	1.20	0.80	1.00	1.25	1.09	0.97	1.15	1.14	0.89	1.00	1.00	1.29	0.95
贵州	1.17	1.08	0.78	1.00	1.32	1.00	1.50	1.31	1.21	0.97	1.00	1.00	1.18	1.04
云南	1.11	1.19	0.69	1.00	1.15	1.13	0.96	1.10	1.16	0.92	1.00	1.00	0.99	1.06
陕西	1.08	1.16	0.39	1.00	2.01	1.23	0.91	1.06	1.20	0.77	1.00	1.03	1.15	1.03
甘肃	1.05	1.25	0.69	1.00	1.63	0.82	0.88	1.14	1.24	0.87	1.00	1.03	0.79	1.03
青海	1.12	1.22	0.14	1.00	2.21	1.00	2.15	1.04	1.24	0.59	1.00	1.21	1.00	0.88
宁夏	1.07	0.93	0.37	1.00	2.26	1.00	1.27	1.09	1.26	0.84	1.00	1.00	1.17	0.87
新疆	1.11	1.24	0.32	1.00	2.67	1.00	0.84	1.18	1.37	0.73	1.00	1.00	0.75	0.93

表 3-11 和表 3-12 是全国各省市影响因素的算术平均值。2005-2010 之间，CO₂ 作为副产出处理时与 CO₂ 作为投入处理时相比，影响因素 LE、KE、ES、TEC 变小，OS 不变，CE、TC 变大。2010-2015 年 VRS 假设下 CO₂ 作为投入和作为副产出处理时能源生产力影响因素全国平均值变化与 2005-2010 年的数据大致相同。由此可见，

与 CO₂ 作为副产出相比，CO₂ 作为投入处理时高估了劳动力-能源比、资本-能源比和技术效率对工业能源生产力提高的贡献，低估了当前能源投入对工业能源生产力提高的制约，低估了碳排放-能源比和技术进步对工业能源生产力提高的促进作用。

表 3-11 2005-2010 年 VRS 假设下能源生产力影响因素全国平均值比较

CO ₂ 处理方式	EP ₂₀₀₅	EP ₂₀₁₀	EP ₂₀₁₀ /EP ₂₀₀₅	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC
作为投入	1.07	1.90	1.77	1.06	1.22	0.77	1.00	1.02	1.10	1.70
作为副产出	1.07	1.90	1.77	1.03	1.20	0.45	1.00	2.27	1.05	1.99

表 3-12 2010-2015 年 VRS 假设下能源生产力影响因素全国平均值比较

CO ₂ 处理方式	EP ₂₀₁₀	EP ₂₀₁₅	EP ₂₀₁₅ /EP ₂₀₁₀	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC
作为投入	1.90	2.37	1.25	1.12	1.13	0.93	1.00	1.01	1.02	1.06
作为副产出	1.90	2.37	1.25	1.08	1.11	0.93	1.00	1.37	0.99	1.10

3.1.5 全国各省市工业能源生产力影响因素分析

从上述分析发现，CO₂ 作为副产出的分析方法相比作为投入而言更合理。因此，本节将采用 VRS 假设、把 CO₂ 作为副产出的工业生产效率评价方法用于计算全国各省市的工业生产效率，并将该结果代入 PDA 法中进一步碳源影响工业能源生产力的各个因素。

(1) 全国工业平均能源生产力影响因素

图 3-7 分为 2005~2010 和 2010~2015 年能源生产力各个影响因素的全国平均值。图中可知，2005~2010 年全国平均能源生产力提高了 77%，而 2010-2015 年全国平均能源生产力提高了 25%，可见中国工业领域能源生产力一直有提高，“十五”到“十一五”期间工业能源生产力提高最快，“十一五”到“十二五”期间工业能源生产力增速放缓。

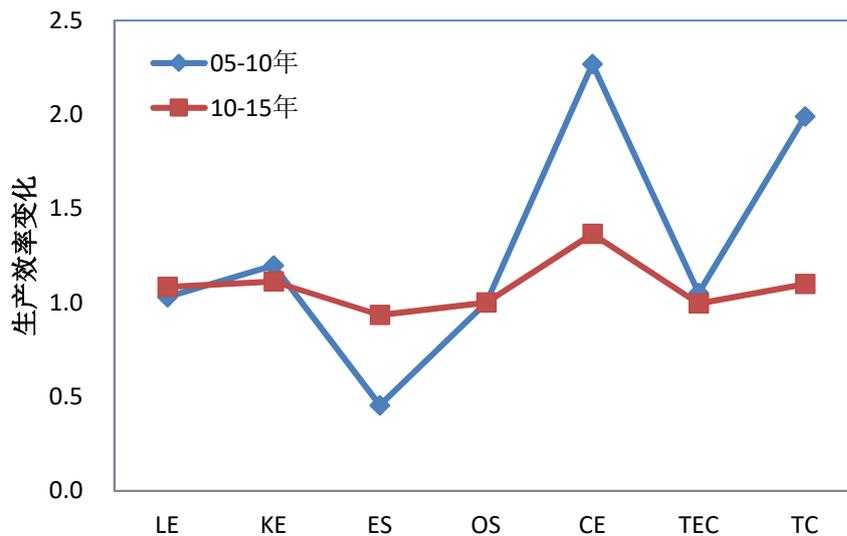


图 3-7 全国工业领域能源生产力影响因素变化

从 2005~2010 年的能源生产力各影响因素值可以看到，这期间碳排放-能源比（CE）和技术进步（TC）是能源生产力提高的主要动力来源，二者的值分别为 2.27 和 1.99。可见通过改革开放引进国外先进技术促进本国技术进步在提高能源生产力方面起到了显著的成效，并且这期间中国的碳排放量超过美国成为全球第一大碳排放国，可以认为该时期中国在碳排放方面受到的约束较少。从非期望产出和期望产出之间的弱可处置性的角度来看，2005~2010 年期间中国工业生产总产值的增长一部分是以非期望产出 CO₂ 的增加为代价的。对能源生产力提高贡献力度较大的其次是资本-能源比（KE）。投资、出口和消费曾被并称为拉动中国经济的“三驾马车”，尤其是在 2005~2010 年，中国经济高速发展的同时，国内市场购买在逐渐加强，并且由于刚加入世界贸易组织不久，国外广阔的市场也刚打开大门，中国经济在投资扩大市场的同时也促进了经济的发展，中国工业领域亦是如此。劳动力-能源比（LE）和产出结构（OS）对能源生产提高影响较小。值得注意的是能源投入对能源生产力的提高有明显的抑制作用。2005~2010 年中国经济发展的另一特点就是“高投入，高耗能，低效率，低产出”，这期间中国经济发展另一个代价就是大量的能源消耗，中国单位 GDP 消耗的能源远远高于发达国家，由此可见能源利用率低同样制约着中国工业能源生产力的提高。

2010~2015 年中国工业能源生产力相对于 2005~2010 年增长变慢。对比 2005~2010 年间的能源生产力影响因素可知，碳排放-能源比（CE）技术进步（TC）虽然仍然是工业能源生产力提高的主要动力来源，但是对工业能源生产力提高贡献的比重

明显下降，这其中存在多方面的原因。一方面是金融危机后全球经济复苏缓慢，中国工业同样增速放缓，另一方是中国工业在这期间由工业化中期进入到了工业化后期的阶段，意味着单纯通过技术引进已经难以支持工业的持续发展，中国工业面临着结构调整和发展转型。除此之外，中国在哥本哈根等会议中承担起越来越多的碳减排责任也是中国工业能源生产力提高的动力改变的原因。资本-能源比（KE）相对于 2005~2010 年的值减小说明中国工业领域投资力度的减小，这里有金融危机和经济转型的双重影响。劳动力-能源比（LE）的贡献有所提升，能源投入（ES）对 EP 提升的限制作用减小，说明中国工业在能源调整方面确有成效。产出结构（OS）和技术效率（TEC）对 EP 提升的影响仍然相对较小。

（2）分区域工业能源生产力影响因素

“十一五”期间，国务院发展规划中心提出了八大综合经济区：一是包括辽宁、吉林、黑龙江在内的东北综合经济区；二是包含北京、天津、河北、山东在内的北部沿海综合经济区；三是包含上海、江苏、浙江在内的东部沿海综合经济区；四是包含福建、广东、海南在内的南部沿海经济区；五是包含陕西、山西、河南、内蒙古在内的黄河中游综合经济区；六是包含湖北、湖南、江西、安徽在内的长江中游综合经济区；七是包含云南、贵州、四川、重庆、广西在内的大西南综合经济区；八是包含甘肃、青海、宁夏、西藏、新疆在内的大西北综合经济区。基于此，此处将从能源生产力的角度探讨以上 8 个地区在“十一五”期间的工业发展特征。结果见表 3-13。

从表 3-13 可以看出，八大综合经济区中工业能源生产力较高的是北部、东部、南部。其中北京、天津、河北、山东组成的北部沿海综合经济区以高新技术研发和制造为特点，上海、江苏、浙江组成的东部沿海综合经济区以极具影响力的多功能制造业为特点，福建、广东、海南组成的南部沿海经济区则以外向型经济为特点，消化了国内外的先进技术。工业能源生产力相对落后的则是大西南和大西北经济区。对比可以发现，中国工业现代化程度高的地区同时也是工业能源生产力相对较高的地区，例如处于中国沿海的北部、东部和南部经济区，而工业现代化低的地区工业能源生产力也相对较低，例如中国的大西北和大西南经济区。

从“十一五”期间中国各区域工业能源生产力增长率来看，东北、北部、东部、南部经济区的增长相对较慢，分别是 55%、69%、68%和 46%。黄河中游、长江中游、大西南、大西北增长较快，分别是 117%、106%、84%、93%。“十一五”期间工业能

源生产力相对较低的经济区域其能源生产力增长都相对较快,可见这期间中国工业化程度相对较低的区域正在加速工业化进程,而工业化程度相对较高的区域已经正面临着工业生产模式的转型。

对比各影响因素可知,CE 是对各经济区域能源生产力的提高贡献最大,可见各大经济区域在“十一五”期间的工业发展都是以较高的碳排放量为代价的。其中北部和东部经济区的 CE 分别是 1.64 和 1.61,在八大经济区域中处于较低水平。从这也可以看到北部和东部经济区正在往低碳工业的方向发展。TC 对八大经济区域能源生产力提高的贡献仅次于 CE,可见技术进步对也是能源生产力提高主要动力来源。中国一直在寻求绿色、低碳的可持续发展道路,意味着 CE 对能源生产力提高的贡献将会逐渐弱化,TC 作为现在能源生产力提高的主要动力之一,未来在提高工业能源生产力的上将承担越来越重要的作用。大部分经济区域的 LE 对能源生产力的提高影响较小,但是南部和大西南经济区的 LE 分别以 1.06 和 1.13 的值位居前列,这现象的出现很大程度上要归功于南部和大西南经济区农村劳动力的盈余。南部和大西南是中国的水稻种植基地,随着农业现代化的加快,大量农村劳动力获得解放,这些盈余的劳动大都转而从事工业生产制造部门,也为南部和大西南经济区工业能源生产力的提高做出了贡献。KE 对能源生产力提高的贡献仅次于 CE 和 TC,其中东北、北部、黄河中游、长江中游经济区的 KE 对 EP 提高贡献较大。相对的,东部、南部、大西南、大西北的 KE 对 EP 提高贡献较小。ES 对各个经济区域的能源生产力提高都是限制作用,其中北部和东部的 ES 对能源生产力提高限制作用较小。值得注意的是北部和东部经济区是中国工业化进程领先的地区,可见加快工业化进程有助于提高能源生产力。OS 对能源生产力的提高既没有促进作用也没有抑制作用,TEC 对各经济区域 EP 提高的影响也相对较小。

从各大经济区域工业能源生产力影响因素的估算值可以发现,中国不同经济区域工业能源生产力影响因素的作用效果基本相同,技术进步和碳排放-能源比都是工业能源生产力提高的主要动力来源,能源投入都抑制了工业能源生产力的提高。但是不同区域的影响因素又存在着一些区别。

表 3-13 “十一五”期间八大综合经济区平均工业能源生产力影响因素

区域	EP ₂₀₀₅	EP ₂₀₁₀	EP ₂₀₁₀ /EP ₂₀₀₅	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC
东北	1.01	1.56	1.55	1.01	1.27	0.29	1.00	2.59	1.14	1.82

北部	1.41	2.38	1.69	1.03	1.26	0.69	1.00	1.64	0.99	1.66
东部	2.03	3.41	1.68	1.04	1.15	0.67	1.00	1.61	1.00	1.48
南部	1.44	2.10	1.46	1.06	1.18	0.32	1.00	2.46	0.95	1.97
黄河中游	0.87	1.88	2.17	1.00	1.24	0.43	1.00	2.35	0.97	2.15
长江中游	0.87	1.79	2.06	1.03	1.26	0.37	1.00	2.70	1.09	2.12
大西南	0.75	1.38	1.84	1.13	1.12	0.48	1.00	2.55	1.22	1.83
大西北	0.59	1.14	1.93	0.93	1.12	0.35	1.00	2.16	1.00	2.75

“十二五”期间，根据中国经济区域划分为东北、东部、中部、西部四大地区。东北地区包括辽宁省、吉林省、黑龙江省；东部地区包括北京市、天津市、河北省、上海市、江苏省、浙江省、福建省、山东省、广东省、海南省；中部地区包括省、安徽省、江西省、河南省、湖北省、湖南省；其余地区则为西部地区。结果见表 3-14。

表 3-14 “十二五”期间四大综合经济区平均工业能源生产力影响因素

经济区	EP ₂₀₁₀	EP ₂₀₁₅	EP ₂₀₁₅ /EP ₂₀₁₀	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC
东北	1.56	1.85	1.19	1.12	1.06	1.00	1.00	0.98	1.05	0.96
东部	2.61	3.34	1.28	1.05	1.06	0.97	1.00	1.15	1.00	1.17
中部	1.76	2.38	1.35	1.08	1.12	1.40	1.00	1.22	0.95	0.99
西部	1.42	1.62	1.14	1.11	1.17	0.63	1.00	1.75	1.00	1.13

由表 3-14 可知，“十二五”期间，工业能源生产力从高到低依次是东部、中部、东北、西部，工业能源生产力增长率从高到低依次是中部、东部、东北、西部。从工业能源生产力及其增长率看，这期间东部、中部和东北、西部的工业能源生产力差距进一步拉大，反映出中国工业发展区域不平衡、并且出现两极分化趋势的问题。

从各影响因素来看，劳动力-能源比对东北、西部两个地区的工业能源生产力的促进作用高于其对东部、中部地区的作用，可见东部、中部地区的人口红利相对于东北、西部地区已经开始弱化。资本-能源比对中部、西部地区的工业能源生产力促进作用高于其对东北、东部地区的作用。东北是中国老工业区，以传统重工业为主，东北工业发展的重点在于尽快解决产能过剩问题、进行转型升级，而东部地区的外向型经济比重较大。2010~2015 年世界经济复苏缓慢，出口乏力的情况下资本投入对工业发展贡献也相对较小，因而资本-能源比对东北、东部地区工业能源生产力提高贡献与其它地区相比较小。能源投入对四大地区的影响各不相同，东部和西部地区的能

源投入抑制了地区工业能源生产力的提高，而中部地区的能源投入则促进了地区工业能源生产力的提高，东北地区的能源投入对地区工业能源生产力的影响较小。碳排放-能源比这一影响因素在东部、中部、西部地区中，是工业能源生产力提高的重要动力来源，说明我国大部分地区工业发展仍然走的是高排放路线。值得注意的是东北地区碳排放-能源比对工业能源生产力提高影响较小。四大地区的产出结构对工业能源生产力的提高既不促进也不抑制。四大地区的技术效率对工业能源生产力提高也相对较小。技术进步在东部地区和西部地区对工业能源生产力提高作用效果比较明显，但是在东北地区和中部地区起到轻微的抑制作用。

3.2 上海市工业各行业能源生产力分析

上海作为我国第一大城市，拥有全国最大的工业基地和最大的外贸港口。然而，能源短缺、难以自给的资源禀赋特征在一定程度上限制其经济及工业的发展。尽管上海市的能源强度近年来持续下降，但相比西方发达国家仍有一定的差距，调整能源投入、响应节能减排迫在眉睫。为进一步探讨上海市工业能源生产力的增长潜力，本章以上海市工业领域为研究对象，用本报告所建立的方法来研究基于全要素的上海市工业领域能源生产力，并从理论上分析可能对上海市全要素能源生产力产生影响的因素。

3.2.1 数据处理

(1) 行业选择

为考察上海市工业领域能源生产力的发展潜力，本章沿用上一节估算全国能源生产力影响因素的基于 Shephard 推广函数的 PDA 法，研究上海工业领域分行业的能源生产力影响因素。选取上海市“十五”、“十一五”和“十二五”期间相关工业部门的相关数据进行实证分析。受统计口径和相关资料的限制，石油、天然气等的开采业合并为采掘业这一个行业，但由于上海市采掘资源少，故本报告中将该行业忽略。制造业中，金属制品、机械和设备修理业是近几年才被细分纳入官方统计，而 2000~2010 年上海能源相关的统计年鉴中没有这一类行业分类。为了使每年的工业行业分类尽量相同，本章忽略 2013 年中的金属制品、机械和设备修理业。同时，由于 2000~2002 年的统计数据中没有细分废弃资源综合利用业，故，本报告也忽略 2000 年的废弃资源综合利用业这一行业。综上，本报告所考察的上海市工业行业中包括 29 个制造

业行业和 3 个电力、燃气及水的生产和供应业行业，共计 33 个行业。表 3-15 列出了具体 33 个工业部门及序号，如无特别说明，后文中的行业序号即所对应的工业行业。

表 3-15 上海市工业行业分类

行业 代号	行业名称	行业 代号	行业名称
1	农副食品加工业	17	橡胶和塑料制品业
2	食品制造业	18	非金属矿物制造业
3	酒、饮料和精制茶制造业	19	黑色金属冶炼和延压加工业
4	烟草制品业	20	有色金属冶炼和延压加工业
5	纺织业	21	金属制品业
6	纺织服装、服饰业	22	通用设备制造业
7	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	23	专用设备制造业
8	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	24	交通运输设备制造业
9	家具制造业	25	电气机械和器材制造业
10	造纸和纸制品业	26	计算机、通信和其他电子设备制造业
11	印刷和记录媒介复制业	27	仪器仪表制造业
12	文教、工美、体育和娱乐用品制造业	28	其他制造业
13	石油加工、炼焦和核燃料加工业	29	废弃资源综合利用业
14	化学原料和化学制品制造业	30	电力、热力生产和供应业
15	医药制造业	31	燃气生产和供应业
16	化学纤维制造业	32	水的生产和供应业

(2) 数据来源

1、经济产出指标。本报告采用 32 个行业的工业总产值作为产出指标。数据来源于 2000~2014 年的《上海统计年鉴》。并根据“分行业工业品出厂价格指数”折算为 2000 年不变价格，单位为亿元。

2、劳动力投入指标。从理论上说，应采用能体现劳动者具体工作时间和效率的指标，即是生产过程中实际投入的劳动量应用标准劳动强度的劳动时间来衡量，但由于教育、培训、工作经验等原因，不同行业的劳动力的质量可能存在较大差异，所以本报告用从业人员数量来代替，数据来源于 2000~2014 年的《上海统计年鉴》，单位

为万人。

3、资本投入指标。依据数据可获得性，本报告选取各行业成本费用总额作为资本的投入指标，数据来源于 2000~2014 年的《上海统计年鉴》，并折算为 2000 年不变价格，单位为亿元。

4、能源投入指标。本报告以上海市各工业行业能源终端消费量来作为能源投入的具体指标，选取煤、石油、天然气、电力为主要消费能源，并且需要把不同种类的能源消费量统一转换为相同的单位。2000 年的数据来自相应年份的《上海工业物资能源交通统计年鉴》，2002~2008 年的数据来自《上海工业能源交通统计年鉴》，其余年份的数据来自《上海能源统计年鉴》。

5、非期望产出指标。本报告将 CO₂ 作为上海市工业领域的非期望产出，由于官方统计中并没有 CO₂ 统计指标，故，本报告采用 IPCC 提出的以能源消费分类为标志的因素分解方法，即碳排放总量等于各种能源消费导致的 CO₂ 排放量的和。

具体公式如下：

$$C_{it} = \sum_{k=1}^4 C_{itk} = \sum_{k=1}^4 E_{itk} \times NCV_{itk} \times CEF_{itk} \times COF_{itk} \times (44/12) \quad (3-1)$$

式中，下标 i 代表 i 行业，下标 t 代表 t 年份； C_{it} 为 i 行业在 t 年份的碳排放总量； $k=1,2,3,4$ 分别代表煤、石油、天然气和电力四种能源； E_{itk} 代表第 k 种能源的终端消费量； NCV_{itk} 表示第 k 种能源的净发热值； CEF_{itk} 表示第 k 种能源的碳潜在排放系数； COF_{itk} 表示碳氧化率；44 和 12 分别是二氧化碳和碳的分子量。

煤、石油、天然气及电力的折标煤系数、净发热值、碳排放系数和碳氧化率见表 3-16。上海市工业分行业的时间序列数据统计特征见表 3-17。

表 3-16 不同能源的折标煤系数、净发热值、碳排放系数和碳氧化率

能源种类	原煤	原油	天然气	电力
折标煤系数	0.7143	1.4286	1.3300	0.1229
净发热值	20908	41816	38931	3600
碳排放系数 (g/MJ)	24.7	20	15.32	-
碳氧化率 (%)	90	98	99	-

注：折标煤系数的单位为 kg_{ce}/kg 或 kg_{ce}/m³（天然气）或 kg_{ce}/kWh（电力）；净发热值的单位为

kJ/kg 或 kJ/m^3 (天然气) 或 kJ/kWh (电力)。

表 3-17 上海市工业分行业数据统计特征

指标	单位	样本数	平均值	中位数	最大值	最小值	标准差
工业总产值	亿元	382	554.6912	236.565	6026.91	3.8	879.4777
二氧化碳	万吨	382	186.1349	26.31634	11076.4	0	747.1519
能源投入	万吨标准煤	382	105.4643	22.23623	5046.233	0.845221	351.6199
资本投入	亿元	382	547.5678	225.895	6014.46	3.87	902.1542
劳动力投入	万人	382	7.917149	4.80125	43.77	0.08	8.146317

3.2.2 能源生产效率结果

表 3-18 为“十五”至“十二五”期间几个代表年份的上海工业各行业的生产效率值。在距离函数的计算中,生产效率小于 1 被称为技术无效,等于 1 时则视为技术有效。从表中可以看到,上海市绝大多数工业行业的生产效率值均小于 1,说明绝大多数行业均处于技术无效性的状态。例如,农副食品加工业 2000 年的生产效率为 0.59,表明 2000 年时农副食品加工业距离上海工业各行业组成的生产前沿面的相对距离为 0.59,意味着这时候的上海农副食品加工业的实际产出仅仅为理想产出的 0.59。此外,该行业 2005 年的值为 0.52,2010 年的值为 0.56,2013 年的值为 0.32,可知上海市农副产品加工业的生产效率在逐年降低。因此 2000 年的上海农副食品加工业是技术无效的。再如烟草制品行业,2000 年、2005 年、2010 年和 2013 年时烟草制品业生产效率均为 1,表示这期间上海市烟草制品业位于各自年份上海工业各行业组成的生产前沿面上,上海烟草制品业当年的产出达到了理想产出。因此上海烟草制品业 2000 年是技术有效的。

表 3-18 2000-2005 年上海市各行业生产效率

行业代号	行业名称	2000	2005	2010	2013
1	农副食品加工业	0.59	0.52	0.56	0.32
2	食品制造业	0.66	0.58	0.83	0.48
3	酒、饮料和精制茶制造业	0.59	0.45	0.84	0.14
4	烟草制品业	1.00	1.00	1.00	1.00
5	纺织业	0.79	0.76	0.50	0.24

6	纺织服装、服饰业	0.82	0.77	0.71	0.48
7	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	0.54	0.46	0.68	0.21
8	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	0.58	0.35	0.51	0.14
9	家具制造业	0.48	0.53	0.52	0.28
10	造纸和纸制品业	0.62	0.51	0.39	0.28
11	印刷和记录媒介复制业	0.57	0.51	0.53	0.21
12	文教、工美、体育和娱乐用品制造业	0.61	0.54	0.72	0.46
13	石油加工、炼焦和核燃料加工业	1.00	1.00	1.00	1.00
14	化学原料和化学制品制造业	0.90	0.97	1.00	0.95
15	医药制造业	0.73	0.63	0.55	0.50
16	化学纤维制造业	1.00	0.37	0.22	0.16
17	橡胶和塑料制品业	0.84	0.83	0.68	0.59
18	非金属矿物制造业	0.78	0.77	0.59	0.44
19	黑色金属冶炼和延压加工业	1.00	1.00	1.00	0.95
20	有色金属冶炼和延压加工业	0.65	0.67	0.70	0.42
21	金属制品业	0.86	0.86	0.72	0.61
22	通用设备制造业	0.90	1.00	0.95	0.89
23	专用设备制造业	0.76	0.78	0.77	0.66
24	交通运输设备制造业	1.00	0.92	1.00	1.00
25	电气机械和器材制造业	0.93	0.96	1.00	0.84
26	计算机、通信和其他电子设备制造业	1.00	1.00	1.00	1.00
27	仪器仪表制造业	1.00	1.00	0.99	0.73
28	其他制造业	0.58	0.32	0.34	0.17
29	废弃资源综合利用业	/	0.33	0.95	0.14
30	电力、热力生产和供应业	0.77	1.00	1.00	0.78
31	燃气生产和供应业	0.36	0.14	0.39	0.35
32	水的生产和供应业	0.97	0.30	0.14	0.30

为了对上海工业领域各行业历年的生产效率有更直观的认识，将上述结果绘制成图表，如图 3-8 所示。从图中可以看到，烟草制品业，石油加工、炼焦和核燃料加工

业，计算机、通信和其他电子设备制造业这 3 个行业在“十五”至“十二五”期间的生产效率都是 1，从值上看是技术有效的。除此之外，化学原料和化学制品制造业，黑色金属冶炼和延压加工业，通用设备制造业，交通运输设备制造业，电器机械和器材制造业这 5 个行业的生产效率虽然不是每年都达到 1，但是它们历年的值都在 0.80 以上，生产效率保持在相对较高的水平。

从上述八个历年生产效率都比较高的行业来看，可以发现烟草制品业，石油加工、炼焦和核燃料加工业，黑色金属冶炼和延压加工业在上海是具有垄断性质的行业。计算机、通信和其他电子设备制造业，化学原料和化学制品制造业，交通运输设备制造业，电器机械和器材制造业属于新兴产业。通用设备制造业，交通运输设备制造业则属于设备制造产业。具有垄断性质的行业由于其在市场中的特殊地位，行业收益能源相对于其他行业更强，因此实际产出接近理想产出。而新兴产业由于市场需求的作用使得产业规模不断扩大，在产业规模扩大过程中不同个体之间的相互竞争促进了生产效率的提高。设备制造业的高效率一定程度上得益于上海近几十年的工业发展，工业本身是原材料加工业部门，对设备有硬性的需求，上海工业的迅速发展也促进了上海设备制造业的良性发展。

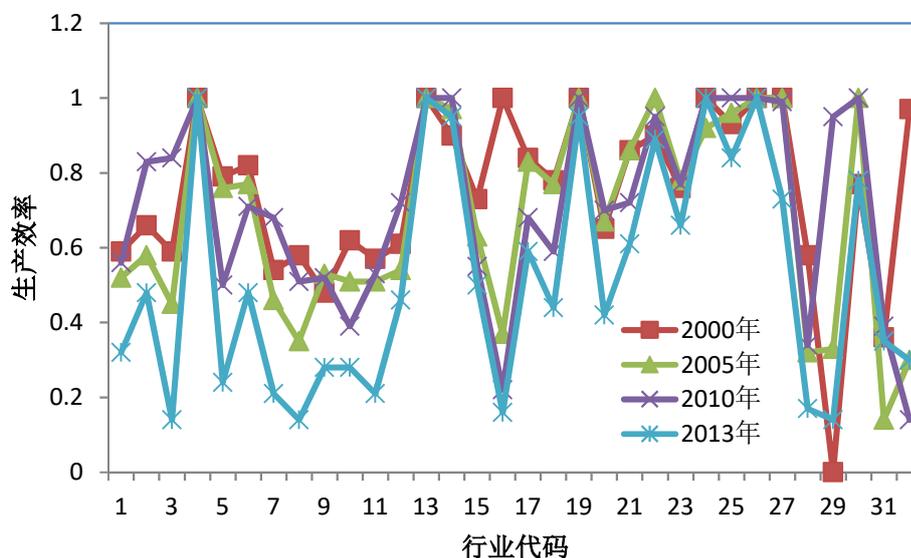


图 3-8 上海市各行业生产效率变化

从图 3-8 还可以看到一些生产效率相对较低的行业。皮革、毛皮、羽毛及其制品和制造业，木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业，家具制造业，造纸和纸制品业的生产效率都相对较低，历年生产效率值大多在 0.60 以下。由于上海相对特殊的地理位置和整体城市化水平，上述行业的原材料都必须从上海以外的地方运输到加工地上

海，运输成本相对较高。并且这些行业都是劳动力相对密集的行业，劳动力成本相对较高。除此之外，木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业，家具制造业，造纸和纸制品业产品的附加值都相对较低。综上所述，相对较高的成本和相对较低的产品附加值造成了皮革、毛皮、羽毛及其制品和制造业，木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业，家具制造业，造纸和纸制品业较低的生产效率。生产效率较低的行业还有酒、饮料和精制茶制造业，化学纤维制造业，废弃资源综合利用业，燃气生产和供应业，水的生产和供应业。其中化学纤维制造业存在产能过剩问题，可见影响行业生产效率的因素还有市场供求关系。

3.2.3 工业分行业影响因素分解结果

考虑到工业中不同行业的投入、产出，特别是能源消耗等因素存在较大不同，本节将把上海工业分为制造业和电力、热力、燃气及水生产和供应业两个大类对上海工业能源生产力影响因素进行研究。后续用一类行业表示制造业，二类行业表示电力、热力、燃气及水生产和供应业。表 3-19 中的结果是以“十一五”和“十二五”为代表年份，探讨了这期间上海市各类工业行业能源生产力的变化及影响能源生产力变化的若干因素。其中，“十一五”期间是以 2010 年为代表，“十二五”期间是以 2013 年为代表。表中代码 I 表示一类行业均值，代码 II 表示二类行业均值。同第三章全国的能源生产力影响因素分析方法类似，此处仍然将能源生产力影响因素分解成劳动力-能源比（LE）、资本-能源比（KE）、能源投入（ES）、产出结构（OS）、碳排放-能源比（CE）、技术效率变化（TEC）及技术进步（TC）七个因素。

由表 3-19 的结果可以看到，电力、热力、燃气及水（行业代码 II）的生产和供应业在“十一五”和“十二五”期间的能源生产力下降了 34%，主要原因是其中的电力、热力生产和供应业和燃气生产和供应业能源生产力大幅下降。其中电力、热力生产和供应业（行业代码 30）的能源投入和技术进步影响因素对能源生产力的提高抑制效果显著，电力、热力生产和供应业能源调整优化和技术更新迫在眉睫。燃气生产和供应业（行业代码 31）的能源投入和碳排放-能源比对能源生产力提高抑制作用最大。电力、热力生产和供应业以及燃气生产和供应业都是能源密集型产业，在能源调整优化和产业技术更新上的改革需要更进一步。烟草制品业（行业代码 4），皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业（行业代码 7），家具制造业（行业代码 9），文教、工

美、体育和娱乐用品制造业（行业代码 12），计算机、通信和其他电子设备制造业（行业代码 26），仪器仪表制造业（行业代码 27）等产品具有高附加值的产业的能源生产力远远高于其他制造业。可见提高高附加值产品的制造业在工业中的比例有利于提高能源生产力。

2010~2013 年期间，上海制造业的整体能源生产力是进步的，但是也有部分产业能源生产力是退步的。例如，酒、饮料和精制茶制造业（行业代码 3）的能源生产力在这期间降低了 16%，其能源投入和技术效率的贡献值分别是 0.24 和 0.17，这是抑制能源生产力最大的两个因素。除此之外，资本-能源比对酒、饮料和精制茶制造业能源生产力的提高也表现为抑制。石油加工、炼焦和核燃料加工业（行业代码 12）的能源投入和技术进步两个因素对产业能源生产力的强烈抑制导致产业能源生产力下降。黑色金属冶炼和延压加工业（行业代码 19）的能源生产力下降了 59%，能源投入是导致该行业能源生产力下降的主要因素。

表 3-19 2010-2013 年上海工业能源生产力影响因素

行业代码	EP ₂₀₁₀	EP ₂₀₁₃	EP ₂₀₁₃ / EP ₂₀₁₀	LE	KE	ES	OS	CE	TEC	TC
1	15.10	23.92	1.58	1.00	1.33	0.86	1.00	1.31	0.56	2.32
2	19.84	27.48	1.39	1.00	1.31	1.02	1.00	1.23	0.58	1.75
3	16.10	13.58	0.84	1.00	0.76	0.24	1.00	6.13	0.17	3.70
4	79.53	354.53	4.46	1.01	1.16	1.61	1.00	2.32	1.00	1.11
5	5.87	11.60	1.98	1.00	0.68	1.58	1.00	1.96	0.47	1.55
6	21.06	43.68	2.07	1.00	1.11	0.31	1.00	4.51	0.68	2.09
7	40.34	67.95	1.68	1.00	1.20	1.07	1.00	1.08	0.30	4.61
8	13.27	21.20	1.60	1.00	0.76	0.39	1.00	4.70	0.28	3.31
9	31.50	74.25	2.36	1.00	1.00	1.11	1.00	1.47	0.55	2.61
10	4.09	9.20	2.25	1.00	1.11	0.90	1.00	2.34	0.73	1.42
11	15.77	23.61	1.50	1.00	0.93	0.27	1.00	6.40	0.39	2.20
12	24.12	104.67	4.34	1.00	2.25	0.35	1.00	4.86	0.64	3.62
13	1.45	0.35	0.24	1.18	1.03	0.10	1.00	3.53	1.00	0.46
14	2.61	2.28	0.87	0.99	1.15	0.91	1.00	0.70	0.95	1.41

15	19.31	31.68	1.64	1.00	1.32	1.04	1.00	1.11	0.91	1.42
16	2.47	10.92	4.42	1.00	1.01	4.23	1.00	1.09	0.74	1.27
17	7.97	13.70	1.72	1.00	1.02	1.21	1.00	1.34	0.86	1.21
18	2.28	8.20	3.60	0.91	1.08	2.62	1.00	1.35	0.74	1.32
19	2.79	1.14	0.41	1.08	1.00	0.38	1.00	1.10	0.95	0.90
20	18.08	18.08	1.00	0.99	1.03	0.98	1.00	1.11	0.60	1.54
21	9.77	24.77	2.54	1.00	1.05	0.46	1.00	5.30	0.84	1.20
22	30.21	64.81	2.15	1.00	1.05	1.37	1.00	1.53	0.94	1.05
23	24.52	45.63	1.86	1.00	1.04	1.04	1.00	1.68	0.85	1.22
24	56.52	59.24	1.05	1.01	1.12	0.94	1.00	1.04	1.00	1.03
25	62.60	61.53	0.98	1.00	1.06	0.96	1.00	1.06	0.84	1.10
26	93.91	71.15	0.76	1.01	0.93	0.89	1.00	1.01	1.00	0.88
27	80.61	87.87	1.09	1.00	0.95	1.10	1.00	0.75	0.74	1.79
28	5.55	21.90	3.95	0.99	0.25	2.00	1.00	3.98	0.50	1.97
29	22.73	25.52	1.12	0.99	0.86	0.52	1.00	3.79	0.15	4.22
30	15.28	0.39	0.03	1.00	0.84	0.02	1.00	4.23	0.78	0.50
31	25.34	5.36	0.21	1.00	1.00	0.27	1.00	0.21	0.89	4.29
32	3.24	5.64	1.74	1.00	1.20	1.44	1.00	1.00	2.14	0.49
I	25.17	45.67	1.91	1.01	1.05	1.05	1.00	2.41	0.69	1.87
II	14.62	3.80	0.66	1.00	1.02	0.58	1.00	1.81	1.27	1.76

3.2.4 一类行业影响因素分解结果

此处将进一步探讨影响上海市工业领域中的一类行业——制造业能源生产力的各种影响因素。表 3-20 列举了上海制造业历年来能源生产力平均比值变化及影响因素的比值变化。表中 EP_n/EP_{n-1} 指的是后一年能源生产力与前一年能源生产力的比值。例如，该表中第二列第二行的能源生产力比值 1.19，表示的是 2001 年能源生产力与 2000 年能源生产力的比值，该列余下相应的数值即是与该能源生产力对应的影响因素。需要注意的是 2013 年对应的能源生产力比是 2013 年的能源生产力与 2010 年能源生产力的比值。

表 3-20 上海制造业能源生产力影响因素历年平均值

影响 因素	200 1	200 2	200 3	200 4	200 5	200 6	200 7	200 8	200 9	201 0	201 1	201 2	201 3
EP_n/EP_{n-1}	1.19	1.17	1.22	1.25	1.50	1.13	1.14	1.12	0.93	2.03	0.83	0.82	2.62
LE	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
KE	1.06	1.06	1.23	1.19	1.30	1.21	1.18	1.09	0.93	1.16	1.04	0.99	1.01
ES	3.50	0.89	0.94	1.33	1.06	0.96	1.06	0.99	0.91	1.99	0.94	0.95	2.27
OS	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
CE	0.91	1.34	1.00	1.01	1.11	1.02	0.93	0.99	1.24	1.12	1.05	1.23	2.12
TEC	0.91	0.95	1.04	0.96	1.08	0.95	0.98	1.05	0.95	1.29	1.03	0.99	0.97
TC	1.14	1.21	1.19	1.07	1.01	1.12	1.13	1.11	1.07	0.97	0.92	0.82	2.05

(1) 能源生产力比值变化

图 3-9 列举了上海市历年制造业能源生产力的比值。除 2009 年以外，其它年份的制造业能源生产力都呈现增长趋势。2001~2008 年和 2010 年的增长率都在 12% 以上，2010~2013 年三年的制造业能源生产力增长率达到 91%。上海在 2002~2005 年四年期间的制造业能源生产力增长率分别为 17%，22%，25%，50%，制造业能源生产力的增长率逐渐增加。上海制造业能源生产力增长率增加的 4 年也是中国加入世界贸易组织的头 4 年，可见中国加入世界贸易组织后，上海作为连接中国内地市场和国际市场的枢纽，大量外国资本直接进入上海，也带来了国外先进的管理技术和生产技术，直接促进了上海制造业能源生产力的提高；另一方面，进入上海的外国资本与上海本地资本形成竞争，在竞争中制造业能源生产力也得到了提高，加入世界贸易组织间接促进了上海制造业能源生产力的提高。上海制造业能源生产力 2006 年、2007 年、2008 年的增长率分别为 13%，14%，12%，可见通过国外技术引进和资本竞争引起的制造业能源生产力提高进入了稳定期，制造业这 3 年的能源生产力增长率基本保持在 13% 左右。2009 年上海制造业能源生产力 -17% 的增长率毫无疑问是因为受到全球金融危机的冲击。2010 年，上海制造业能源生产力增长率为 103%，这一方面有前一年制造业能源生产力负增长的影响，另一方面也是上海制造业能源生产力增长率回归正常值、甚至进一步提高的结果。

通过计算可得，2009~2010 年间上海制造业能源生产力平均年增长率为 37%，远远高于 2006~2008 年这 3 年约 13% 的年增长率。2013 年上海制造业能源生产力相对于 2010 年增长了 91%，而 2011~2013 年 3 年上海制造业的能源生产力年平均增长率为 24%，同样明显高于 2006~2008 年 3 年约 13% 的年增长率。可见 2009 年之后上海制造业能源生产力又进入了一个新的高速增长期。中国社会科学院工业经济研究所在《2015 中国工业发展报告》一书中指出，上海在“十一五”期间（200~2010 年）就已经全面进入后工业时代。上海全面进入后工业化时代的后几年制造业能源生产力进入一个新的高速增长期，可见推进工业化进程的各项举措对制造业的总体作用表现为促进能源生产力的提高。

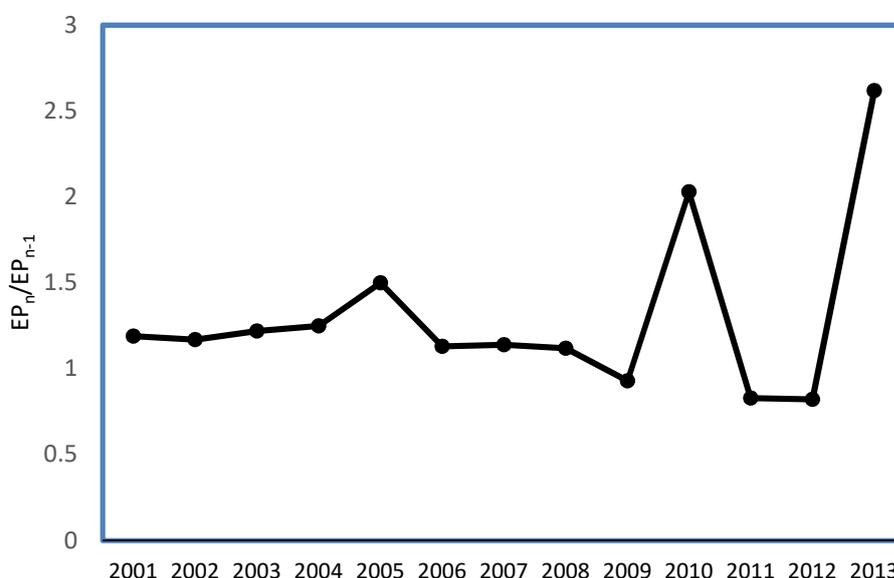


图 3-9 上海制造业历年能源生产力比值

(2) 能源生产力影响因素分析

从上述表 3-20 可知，影响因素劳动力-能源比（LE）和产出结构（OS）这两个影响因素在历年的值都基本是 1，表示这两个影响因素对上海制造业能源生产力几乎没有影响，即对能源生产力的提高既不促进也不抑制。虽然劳动力-能源比（LE）和产出结构（OS）这两个影响因素历年的值几乎相同，但是二者取值为 1 的原因却不同。本报告研究当中的生产活动是一个单产出的模型，因此对于任何一个生产决策单元都认为只有单一产出，即本报告采用的计算模型认为上海制造业各个子行业的唯一产出是工业产值，从而导致所有行业在计算模型当中的产出结构相同，因此在本模型中所有行业在所有年份的产出结构（OS）影响因素都为 1。可见单一产出对所有行业

能源生产力的提高都没有影响。

劳动力-能源比历年各行业平均值也为 1,但却不是所有行业在所有年份该影响因素都严格为 1。以表 4-6 中 2010~2013 年各行业的影响因素—之一劳动力-能源比的值为例,其中烟草制品业(行业代码 4)对应的值是 1.01,石油加工、炼焦和核燃料加工业(行业代码 13)对应的值是 1.18,化学原料和化学制品制造业(行业代码 14)对应的值是 0.99,非金属矿物制造业(行业代码 18)对应的值是 0.91。因此影响因素劳动力-能源比对制造业整体的能源生产力提高表现为影响较小,但是对个别行业能源生产力提高仍然存在较明显的促进或者抑制作用。另外需要强调的是影响因素劳动力-能源比对上海制造业能源生产力提高影响较小,并不意味着劳动力投入对能源生产力的提高没有贡献,而是劳动力投入的发展正好与能源生产力提高所产生的需求相同,否则如果能源生产力提高而劳动投入不变,显然这时候劳动力投入会成为能源生产力提高的阻碍因素。

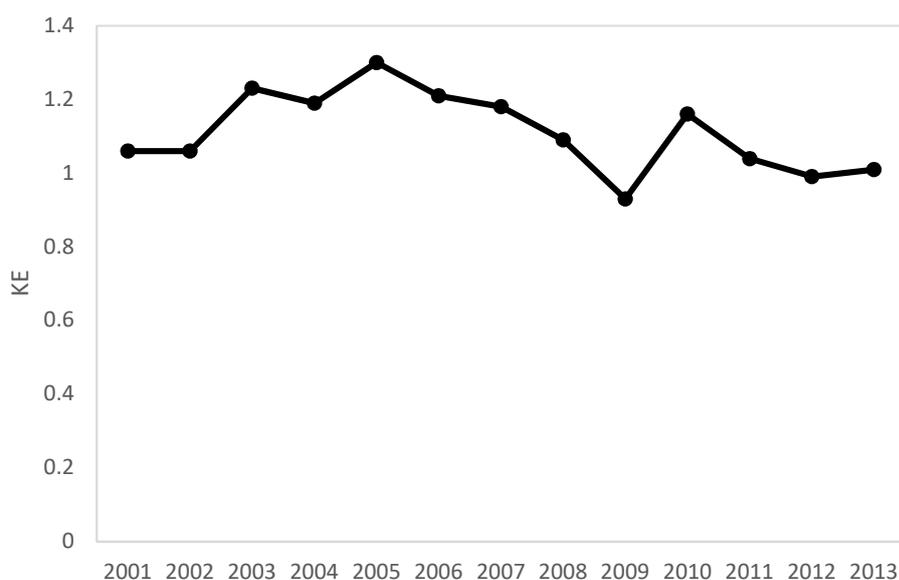


图 3-10 上海制造业历年 KE 值

影响因素资本-能源比是上海制造业能源生产力提高的主要持续动力来源之一。资本-能源比可以对能源生产力的影响可以认为是资本投入对能源生产力的影响。从资本-能源比对上海制造业的能源生产力历年的影响值可以发现(图 3-10),2001 年和 2002 年影响因素资本-能源比的值都是 1.06,但是 2003~2007 年该值分别为 1.23、1.19、1.30、1.21 和 1.18,资本投入对能源生产力提高的促进作用明显上升。显然中国在 2001 年加入世界贸易组织后,广阔的国际市场面向上海制造业开放,而上海独

特的经济环境也吸引了众多的国外资本，结果就是上海制造业的资本投入和资本竞争促进了能源生产力的提高。但是 2008 年爆发的全球金融危机显然对上海制造业的发展产生了巨大的影响，影响影响之一就是资本投入的能源生产力提高的贡献减小，2008 年影响因素资本-能源比的值下降到 1.09。到了 2009 年金融危机的影响持续加深，对资本投入对能源生产力的提高甚至变为抑制作用，2009 年影响因素资本-能源比的值进一步下降，为 0.93。到 2010 年，影响因素资本-能源比的值又上升到 1.16，但是 2010~2013 年资本投入对上海制造业能源生产力提高的促进作用已经明显变小，影响因素资本-能源比的值仅为 1.05。

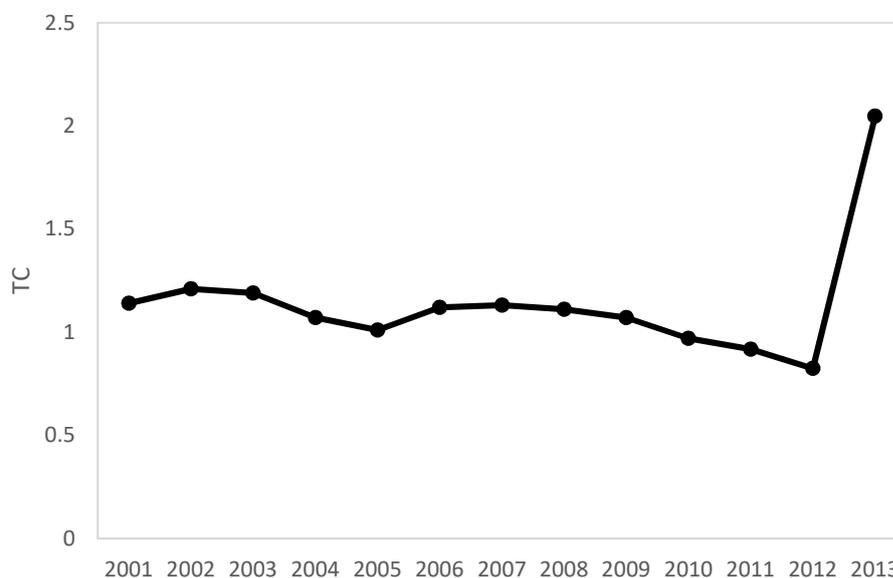


图 3-11 上海制造业历年 TC 值

技术进步是上海制造业能源生产力提高的另一个主要持续动力来源。如图 3-11 所示，2001~2010 年和 2013 年影响因素技术进步的值分别为 1.14、1.21、1.19、1.07、1.01、1.12、1.13、1.11、1.07、0.97、1.87。相比影响因素资本-能源比，2011 年以前技术进步对上海能源制造业能源生产力提高的贡献相对较小，这一定程度上可以说明上海制造业在 2011 年以前“量”的增长快于“质”的增长。投资意味着扩大生产规模，但是生产规模不可能无限扩大，因此投资对制造业能源生产力的高贡献不可能一直维持。从上面的分析可以获知，投资对生产能源生产力的提高的贡献在 2010~2013 年已经显著下降，为 1.05，而在此期间技术进步对上海制造业能源生产力提高的贡献上升明显，影响因素技术进步的价值为 1.87。可见上海在全面进入后工业化时代后，同时在面对国际经济复苏缓慢，国内“三期叠加”、经济面临巨大下行压力的情况下，

经济结构的调整和转型已经初见成效，技术进步对制造业能源生产力的提高贡献显著上升，上海制造业已经走出了创新发展的第一步。

由于本报告的生产模型采用的是将煤、石油、天然气和电力几种能源统一为单一的能源投入，因此本报告的能源结构可以理解为能源投入。能源投入对能源生产力提高的影响也可以理解为能源投入对能源生产力提高的影响。从历年影响因素能源投入的值可以看到（图 3-12），能源投入对上海制造业能源生产力提高的影响并不固定，有些年份表现为促进作用，如 2001 年、2004 年、2005 年、2007 年等，有些年份表现为抑制作用，如 2002 年、2003 年、2006 年、2008 年等。通过优化能源投入，增加高效率能源在能源总量中的比重，提高能源使用效率，毫无疑问可以促进能源生产力的提高。但是 2010~2013 年能源投入对上海制造业能源生产力的促进作用较小，可见上海制造业在能源投入优化和能源效率提高上有较大的提升空间。

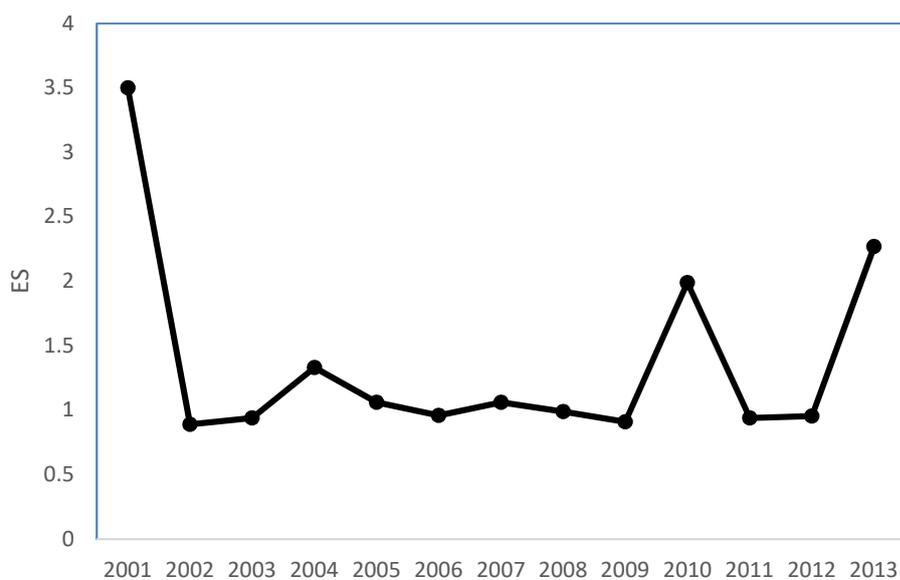


图 3-12 上海制造业历年 ES 值

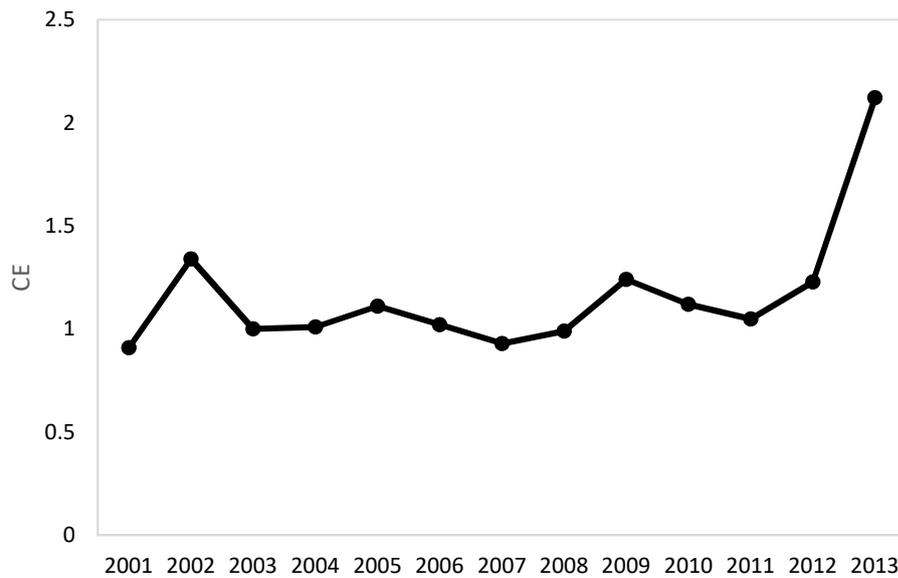


图 3-13 上海制造业历年 CE 值

图 3-13 为碳排放-能源比对上海市制造业能源生产力变化的影响结果。碳排放-能源比对能源生产力的影响可以看作副产出 CO_2 排放量对能源生产力提高的影响。简单地从 CO_2 排放量与能源生产力的关系来看，能源生产力是期望产出工业产值和能源消耗的比值， CO_2 作为副产出，与期望产出之间存在弱可处置性，期望产出工业产值增加势必引起副产出 CO_2 排放量增加。从生产活动中的物质转换来看， CO_2 又主要由能源投入中的化石能源转换而来，化石能源是目前工业的主要能源之一。因此 CO_2 排放量增加势必引起能源消耗的增加。可见碳排放-能源比对能源生产力的影响是能源投入考查期间内能源投入调整、能源使用效率变化的综合体现。从表 3-20 中可以看到 2007 年以前 CO_2 排放量对上海制造业能源生产力提高影响较小，但是 2008 年之后影响因素碳排放-能源比历年的值都远远大于 1，分别为 1.24、1.12、2.41。可见，经历 2008 年的金融危机之后，上海制造业在调整能源投入和提高能源效率方面的努力卓有成效。

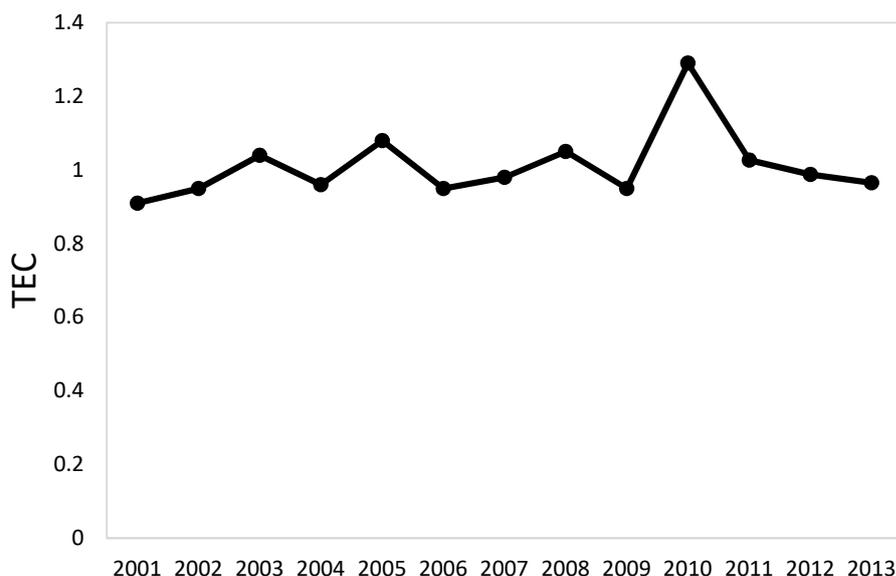


图 3-14 上海制造业历年 TEC 值

图 3-14 为技术进步因素对上海市制造业能源生产力的影响变化趋势。上海制造业的技术效率多数年份小于 1，如 2001 年的 0.91、2002 年的 0.95、2004 年的 0.96。一方面说明上海制造业的生产效率有轻微的下趋势，另一方面说明上海制造业的产出潜力相比以往有轻微的上升的趋势。尤其是在 2010~2013 年间，上海全面进入后工业化时代的 3 年时间里，同时也是上海制造业面临结构调整、产业升级等改革巨大压力的 3 年。经过 3 年的调整，上海制造业 2013 年相对于 2010 年的技术效率为 0.69，说明上海制造业在现有的生产条件下生产潜力比以往更大，急需提高生产效率，释放生产潜力。

综上所述，技术进步和资本-能源比是这十多年来上海制造业能源生产力提高的持续动力来源，劳动力-能源比、产出结构对能源生产力影响较小，能源投入、碳排放-能源比和技术效率对能源生产力影响呈现波动趋势。

3.2.5 二类行业影响因素分解结果

此处将简要探讨上海市工业领域二类行业——电力、热力、燃气及水的生产和供应业的能源生产力影响因素。结果见表 3-21。同一类行业制造业结果类似，表中 EP_n/EP_{n-1} 指的是后一年能源生产力与前一年能源生产力的比值。

由历年的能源生产力比值结果可知，上海电力、热力、燃气及水生产和供应业的能源生产力总体呈现上升趋势，但是 2008~2009 年和 2010~2013 年都出现下降的现

象。其中 2010~2013 年虽然碳排放-能源比、技术效率和技术进步对能源生产力提高表现了较大的促进作用,但是能源投入同时也对能源生产力提高表现为较大的抑制作用,总体效果表现为能源生产力的下降。

同制造业相似,电力、热力、燃气及水生产和供应业能源生产力提高的动力也主要来源于资本-能源比和技术进步,资本-能源比对能源生产力提高的贡献有下降趋势,技术进步对能源生产力提高的贡献与往年相比上升明显。由于电力、热力、燃气及水生产和供应业相对于制造业对能源有更高的依赖度,电力、热力、燃气及水生产和供应业的能源投入能源生产力的提高呈现更显著的抑制作用。劳动力-能源比和产出结构对电力、热力、燃气及水生产和供应业能源生产力影响较小。碳排放-能源比和技术效率对电力、热力、燃气及水生产和供应业能源生产力的提高呈现波动的趋势,但是 2009-2013 年这两个影响因素对电力、热力、燃气及水生产和供应业能源生产力的提高都有促进作用。

表 3-21 上海工业领域二类行业能源生产力影响因素历年平均值

影响因 素	200 1	200 2	200 3	200 4	200 5	200 6	200 7	200 8	200 9	201 0	201 1	201 2	201 3
EP _n /EP _{n-1}	0.75	2.20	1.10	1.02	1.18	1.54	1.09	1.27	0.97	1.09	0.69	0.66	0.51
L													
LE	0.99	0.98	1.00	1.00	0.98	0.99	0.98	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	0.99
KE	1.00	1.03	1.16	1.08	1.12	1.21	1.04	1.21	1.08	1.03	1.01	1.03	1.05
ES	0.90	1.22	0.96	0.93	0.85	0.99	1.05	0.85	0.90	0.97	1.01	0.72	1.02
OS	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
CE	0.83	1.05	1.02	0.94	1.26	0.86	0.44	5.85	1.01	1.04	0.94	2.77	1.73
TEC	0.90	0.75	0.87	0.96	1.14	1.21	3.03	0.49	0.96	1.10	2.92	0.92	0.95
TC	1.06	2.17	1.17	1.16	0.91	1.40	1.30	0.95	1.05	1.01	0.66	0.67	2.03

3.3 小结

本章用 DEA 方法对全国工业领域和上海市工业各行业的能源生产力进行了评价分析。具体来看,通过对传统 Shephard 距离函数中加入非期望产出 CO₂ 的约束项,弥补了传统 Shephard 距离函数直接把副产出作为投入处理或者无法把副产出计入生

产效率估算当中的缺陷，本报告把这种方法称为 Shephard 推广函数。基于此，本章还结合 PDA 法、在 CRS 和 VRS 两种不同生产条件假设下分别计算了全国各省市的工业生产效率和工业能源生产力影响因素。通过对比上述计算结果，得到以下基本结论：（1）CRS 假设下的工业生产效率小于或等于 VRS 假设下的工业生产效率；（2）CO₂ 作为投入处理时的工业生产效率小于或等于作为副产出处理时的工业生产效率；（3）技术进步是推动中国能源生产力提高的主要动力来源之一；（4）资本投入对中国能源生产力的提高也有重要的促进作用；（5）中国东部沿海能源生产力相对较高，西部地区能源生产力相对较低，并且在“十二五”期间这种差距有拉大的趋势，反映出中国地区发展的不均衡性；（6）能源投入在“十一五”期间对所有经济区域工业能源生产力提高表现为抑制作用，但到“十二五”期间这种抑制作用减小，并且部分地区表现为促进作用。

基于 Shephard 推广函数的 PDA 法，将上海市工业分成 32 类行业，并分别对各行业的能源生产力进行分析。得到的主要结论如下：（1）具有垄断性质的产业、新兴产业和设备制造类产业的生产效率较高。（2）投入资本相对高而产品附加值相对较低的产业生产效率较低。（3）上海制造业能源生产力在 2010~2013 年有加速增长的趋势。（4）劳动-能源比、产出结构对上海工业总体能源生产力影响较小。（5）碳排放-能源比对能源生产力提高表现为促进作用，能源投入对能源生产力提高表现为轻微的抑制作用。（6）资本-能源比和技术进步上海工业能源生产力提高的主要动力来源。（7）产品高赋值产业能源生产力较高。（8）能源投入和碳排放等影响因素是能源密集型产业能源生产力提高的主要阻力。

第四章 基于 SFA 的工业能源生产力分析

本章基于同样的样本数据，以全国工业领域和上海市工业各行业为研究对象，用 SFA 方法对其能源生产力进行了分析，并比较了 SFA 法和 DEA 法在处理结果方面的异同，在这基础上选取了更合适的能源生产力评价方法对上海市某一工业园区进行典型性分析。

4.1 全国各地区工业能源生产力分析

根据上述研究模型和面板数据，本文采用 Frontier4.1 软件对 2.3 中的研究模型进行估计，实证分析了“十五”、“十一五”“十二五”三个典型时期中国工业领域各行业的技术效率和能源生产力影响因素。

4.1.1 随机前沿生产函数估计

Frontier4.1 运行得到的随机前沿生产函数模型的估计结果如表 4-1 和表 4-2 所示。从表 4-1 来看， γ 的值为 0.072，说明随机前沿生产函数的误差主要来源于统计误差等外部因素的影响，少部分来自于技术无效率项 u_{it} 。因此，采用最小二乘法得到的参数估计结果更为合适，具体估计结果如表 4-2 所示。

表 4-1 最大似然估计法得到的随机前沿生产函数系数值

系数含义	待估系数	系数估计值	标准差	t 比率
常数项	β_0	0.922	0.187	4.923
资本影响因子	β_1	0.441	0.038	11.635
劳动力影响因子	β_2	0.544	0.038	14.503
能源影响因子	β_3	0.282	0.070	4.046
碳排放影响因子	β_4	-0.141	0.188	-0.749
技术无效率比重	γ	0.072	0.209	0.342

从表 4-2 可以看到，模型中的所有系数都能通过 1% 的显著性水平检验，且各系数的标准差较小，说明系数估计值具有较高的稳定性和可靠性。模型的总体方差为 0.334，方差值小于 1，表明随机误差项和无效率项的波动幅度都较小。

表 4-2 最小二乘法得到的随机前沿生产函数系数值

系数含义	待估系数	系数估计值	标准差	t 比率
常数项	β_0	0.885	0.173	5.117
资本影响因子	β_1	0.439	0.038	11.573
劳动力影响因子	β_2	0.541	0.046	11.855
能源影响因子	β_3	0.315	0.221	1.424
碳排放影响因子	β_4	-0.168	0.205	-0.818

能源生产力的定义是： $\eta_t = y_t / E_t$ ，即在一定时间内系统创造的经济产出与投入该系统的能源要素的比率。结合定义与 SFA 模型来看，影响经济产出的因素以同样的影响系数影响着能源生产力，唯有能源投入项对经济产出的影响系数（ β_3 ）与其对能源生产力的影响系数不同，能源投入对能源生产力的影响系数为 $\beta_3 - 1$ 。由表 4-2 可知，资本投入对能源生产力的影响系数 β_1 为正数（0.439），说明资本要素对中国工业能源生产力的提升有积极的作用；劳动力投入的影响系数 β_2 为 0.541，大于资本投入对能源生产力的影响系数 β_1 ，说明劳动力对中国工业能源生产力的影响也是积极的，且影响程度大于资本投入；能源投入对经济产出的影响系数为 0.315，而对工业能源生产力的影响系数为-0.685，表明能耗的增加能促进中国工业领域的经济产出，却会阻碍中国工业能源生产力的提升；碳排放量的影响系数为-0.168，表明减少碳排放（即提高环境的承载能力）有利于提高中国工业领域的能源生产力，所以此处，将碳排放投入项解释为环境的承载能力就更为合理一些。

从影响系数来看，能源投入对中国工业能源生产力的影响程度最大，其次为劳动力、资本投入和碳排放。劳动力要素对中国工业经济产出仍起主要的贡献作用，而资本、能源要素对中国工业经济产出的贡献小于劳动力。这说明：在中国工业领域中，劳动密集型产业仍占据主导地位，资本、能耗密集型产业紧随其后，产业结构发展相对比较均衡。对于中国这样一个劳动力比较充足而资源相对紧缺的国家来说，这种产业发展模式是实现经济可持续发展的必然结果。但是，近年来我国劳动力人口连续下降，劳动力的减少会造成我国福利水平、GDP 和居民收入的降低，带来劳动力价格的升高，劳动力密集型产业的产品价格升高、产出和出口减少^[61]。这些不利影响致使劳动密集型产业呈现外迁趋势，这对于我国工业能源生产力的提升极其不利。为了减弱劳动力人口减少产生的负面影响，可以从优化劳动力资源配置入手，提升劳动力质

量，增加技术劳动力。

4.1.2 无效率模型估计

运用 Frontier4.1 对无效率模型进行了估计，估计结果如表 4-3 所示。从表 4-3 可以看到，无效率模型中各系数的估计值都接近于 0，说明随机前沿生产函数中的误差主要来自统计噪声而非生产无效率，也说明了煤炭消费比重、石油消费比重、天然气消费比重和电力消费比重对中国工业领域的生产效率水平几乎没有影响。

表 4-3 无效率模型参数值

系数含义	待估系数	系数估计值	标准差	t 比率
常数项	δ_0	-0.088	0.617	-0.143
煤炭消费比重因子	δ_1	0.004	0.017	0.261
石油消费比重因子	δ_2	-0.012	0.013	-0.888
天然气消费比重因子	δ_3	-0.003	0.019	-0.159
电力消费比重因子	δ_4	0	0.019	-0.018

4.1.3 中国工业领域技术效率分析

在采用 Frontier4.1 估算无效率模型时，还估算出了全国 31 个省市的在 2005 年、2010 年和 2014 年的工业生产技术效率值，具体结果见表 4-4 所示。从估算结果来看，在“十五”、“十一五”和“十二五”三个时期中，中国工业领域的平均生产技术效率值为 0.943，表明投入要素的利用效率相对较高，实际产出已经接近最佳前沿面产出。

从表 4-4 可以看出，在“十五”时期末，全国有 21 个省市的工业生产技术效率在 0.9 以上（包括 0.9），占到全国各省市的三分之二。其中，除了北京、天津、上海、重庆这四个直辖市外，还有东北三省（辽宁、吉林、黑龙江）、东部江浙地区、西部地区等。其他 10 个省市的工业生产技术效率均小于 0.9，贵州省的工业技术效率水平最低，只有 0.805。内蒙古、山西、安徽、湖南和云南五省的工业技术效率水平也相对较低，只有 0.85 左右。到“十一五”时期末，工业生产技术效率水平达到 0.9 及以上的省市数量增加至 23 个，其中上海市的工业生产技术效率水平最高，等于 1，说明上海市工业领域的经济产出几乎等于最佳前沿面产出。内蒙古、河北、陕西、宁夏四省的技术效率从“十五”时期末的低于 0.9 提升至“十一五”时期末的高于 0.9，水平提升

较快。但是，河北和广西两省的工业技术效率水平下降到 0.9 以下。到 2014 年，工业生产技术水平达到 0.9 以上的省市共有 28 个，其中上海市的工业技术效率水平仍旧保持为 1，北京市也达到 1，这两个地区的工业技术效率水平最高，说明这两个地区工业领域的投入要素的利用效率最高，且经济产出几乎达到最佳前沿面水平。而山西、云南两省的工业技术水平仍旧低于 0.9，这两个地区需要提高自身工业领域的技术效率，从而缩小实际产出与最佳前沿面产出的距离。综上，从“十五”时期以来，中国工业领域的技术效率水平在逐渐提升，个别技术效率水平较低的省份需要结合自身情况，同时借鉴技术效率水平较高省份的经验，优化自身的投入产出比。

表 4-4 中国各省份工业领域的技术效率值

省份	2005	2010	2014	省份	2005	2010	2014
北京	0.992	0.992	1.000	湖北	0.934	0.889	0.945
天津	0.984	0.991	0.992	湖南	0.852	0.900	0.954
河北	0.881	0.914	0.897	广东	0.990	0.987	0.984
山西	0.850	0.887	0.859	广西	0.900	0.893	0.933
内蒙古	0.846	0.958	0.951	海南	0.985	0.988	0.986
辽宁	0.981	0.988	0.987	重庆	0.923	0.919	0.935
吉林	0.979	0.960	0.971	四川	0.938	0.944	0.968
黑龙江	0.985	0.984	0.985	贵州	0.805	0.876	0.924
上海	0.992	1.000	1.000	云南	0.851	0.899	0.890
江苏	0.978	0.966	0.966	西藏	0.971	0.969	0.966
浙江	0.968	0.975	0.975	陕西	0.866	0.950	0.956
安徽	0.853	0.854	0.903	甘肃	0.972	0.979	0.971
福建	0.965	0.969	0.983	青海	0.968	0.976	0.979
江西	0.903	0.941	0.938	宁夏	0.885	0.937	0.940
山东	0.938	0.941	0.959	新疆	0.991	0.972	0.981
河南	0.887	0.878	0.941				

各省市工业领域在“十五”、“十一五”、“十二五”三个时期的平均技术效率水平如图 4-1 所示。由 Frontier4.1 估计结果可知，这三个时期全国工业领域的技术效率水平为 0.943。由图 4-1 可以看出，全国共有 17 个省市的工业平均技术效率达到全国平均

水平，平均技术效率水平最高的是上海，高达 0.997，其次为北京，高达 0.995。此外，还有 14 个省市的工业平均技术效率处于全国平均水平以下。山西、贵州和安徽三个省份的平均技术效率较低，山西省的平均技术效率最低，仅有 0.865，贵州和安徽也分别只有 0.868 和 0.870，说明此三省工业领域的资源利用效率较低，实际经济产出距离最佳前沿面产出较远。工业技术效率的区域差异性主要跟各省份的产业结构、资源配置结构和科技创新水平等有关。例如，上海市工业领域的高新技术企业较多，相应地研发投入、技术水平及生产设备总体优于山西等地区，所以其技术效率远高于山西等地；而山西、贵州等技术效率落后地区由于其地理劣势及产业特征决定了其技术水平低下，故技术效率水平较低。

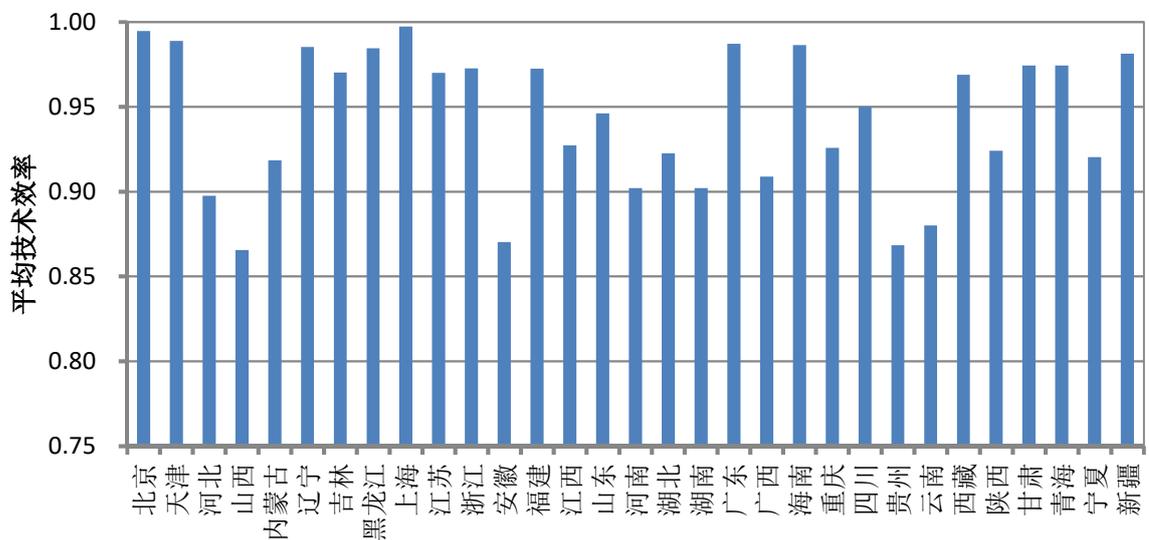


图 4-1 2000-2014 年各省市工业领域的平均技术效率

从“十五”时期到“十二五”时期，各省市工业领域的技术效率增长速度如图 4-2 所示。相比于“十五”时期，全国大部分省市在“十二五”时期的工业技术效率水平都提升了，只有五个省份的技术效率水平有少许下降。其中，贵州省尽管平均技术效率较低，但是其增长速度最快，增长率高达 14.78%。内蒙古、湖南和陕西的工业技术效率也有一个相对比较大的增长，增长率都超过 10%。江苏、新疆、吉林、广东和西藏的工业技术效率增长率为负，说明这些省份的技术效率水平相比于“十五”时期有所下降。由于国家对技术创新的重视程度越来越高，我国的整体技术水平在不断进步，所以到“十二五”时期末，我国大部分省份的工业技术效率相比于“十五”时期都在提升，个别省份的工业技术效率稍有降低可能与相应地区的产业结构调整和技术研发及引进力度有关。

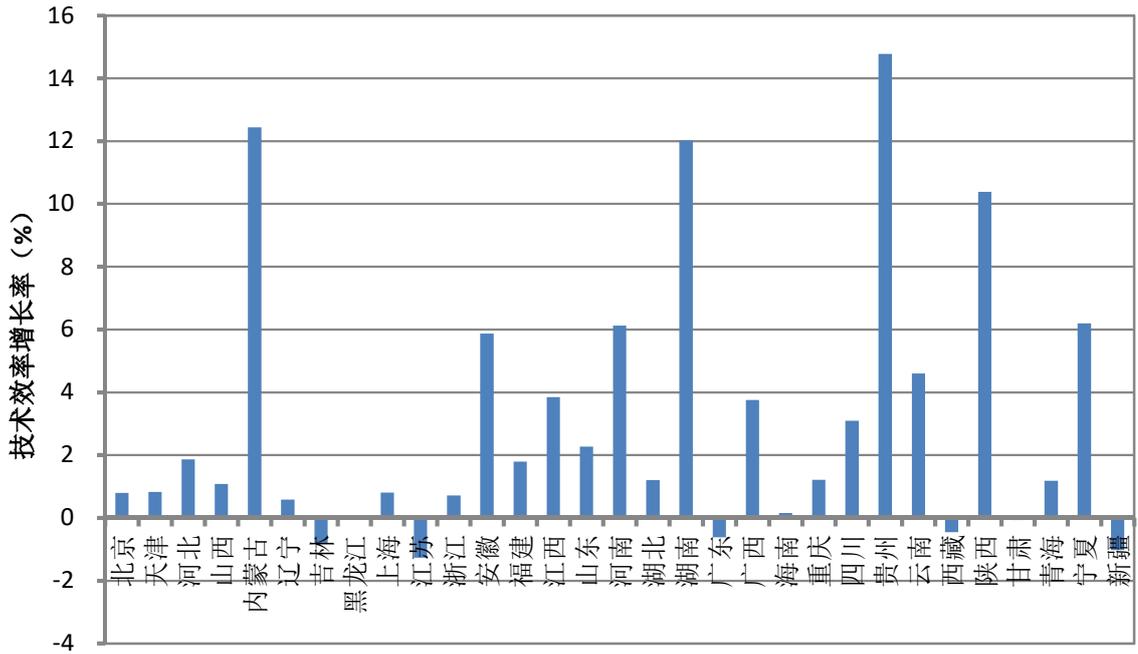


图 4-2 2000-2014 年各省市工业领域技术效率增长率

4.2 上海市工业各行业能源生产力分析

本节仍旧采用 BC（1995）模型对上海市工业领域的能源经济系统进行评价，具体研究模型与 4.1 小节一致。根据随机前沿生产函数模型和上海市各类工业行业的面板数据，此次采用 Frontier4.1 软件对随机前沿生产函数模型和无效率模型进行估计，实证分析了在 2000~2013 年间上海市工业领域各行业的技术效率和能源生产力影响因素。

4.2.1 随机前沿生产函数估计

表 4-5 给出了随机前沿生产函数模型的估计结果。从表 4-5 来看，模型的总体方差为 0.334，方差值小于 1，表明随机误差项和无效率项的波动幅度都较小。 γ 的值为 0.935，并且在 1% 的显著性水平下显著，说明随机前沿生产函数的误差主要来源于技术无效率项 u_{it} ，少部分来自于统计误差等外部因素的影响。因此，采用 SFA 模型是合理有效的。此外，模型中的所有系数都能通过 1% 的显著性水平检验，且各系数的标准差较小，说明系数估计值具有较高的稳定性和可靠性。

表 4-5 随机前沿模型系数估计结果

系数含义	待估系数	系数估计值	标准差	t 比率
常数项	β_0	0.390	0.067	5.814

资本影响因子	β_1	1.000	0.019	53.309
劳动力影响因子	β_2	-0.077	0.012	-6.253
能源影响因子	β_3	0.341	0.025	13.379
碳排放影响因子	β_4	-0.346	0.021	-16.499
技术无效率比重	γ	0.935	0.011	88.530

结合能源生产力定义与 SFA 模型来看，影响经济产出 y_{it} 的因素以同样的影响系数影响着能源生产力，唯有能源投入项对经济产出的影响系数（ β_3 ）与其对能源生产力的影响系数不同，能源投入对能源生产力的影响系数为 $\beta_3 - 1$ 。由表 4-5 可知，资本存量对能源生产力的影响系数（1.000）为正，说明资本要素对上海市工业能源生产力的提升有积极的作用；劳动力投入的影响系数为 -0.077，几乎为 0，说明劳动力对上海市工业能源生产力的影响比较小，而且上海市工业领域存在轻微的劳动力过剩情况；能源投入对经济产出的影响系数为 0.341，而对工业能源生产力的影响系数为 -0.659，表明能耗的增加能促进经济产出，却会阻碍能源生产力的增长；碳排放量的影响系数为 -0.346，表明减少碳排放（提高环境承载能力）有利于提高上海市工业领域的能源生产力，所以此处应将碳排放投入项解释为环境承载能力。从影响系数来看，资本投入对上海市工业能源生产力的影响程度最大，其次为能源投入、碳排放量，劳动力对能源生产力的影响最小。劳动力要素对工业经济产出的贡献日益减弱，而资本、能源要素对工业经济产出的贡献却在增加，这说明在上海市工业领域中，劳动密集型产业已逐渐被资本、能耗密集型产业所替代。因此，为了提高上海市工业能源生产力水平，优化上海市工业经济、能源与环境三者之间的关系，需增加资本投入并减少工业能耗与排放。

4.2.2 无效率模型估计

由表 4-6 可知，除了常数项 δ_0 外，无效率模型中的其他系数都是显著的。煤消耗比重、石油消耗比重及天然气消耗比重的系数为负，表明对上海市工业领域来说，增加煤、石油、天然气在能源消耗总量中的比重有助于生产效率的提升。而电力消耗比重的系数为正，说明电力消耗比重的增加对技术效率有消极的影响，这很大程度上是因为在电力的生产过程中会损失技术效率。

表 4-6 无效率模型的估计结果

系数含义	待估参数	参数估计值	标准差	t 比率
常数项	δ_0	-0.149	0.436	-0.342
煤炭消费比重因子	δ_1	-4.578	0.510	-8.972
石油消费比重因子	δ_2	-3.843	0.622	-6.177
天然气消费比重因子	δ_3	-4.655	0.486	-9.576
电力消费比重因子	δ_4	1.473	0.434	3.393

4.2.3 行业技术效率分析

估计结果显示:上海市工业领域整体在 2000~2013 年间的平均技术效率为 0.81, 相对于生产前沿面来说, 还有 19%的改善空间; 各行业的技术效率均小于 1, 说明上海市工业各行业的生产过程处于技术无效率状态, 没有达到最佳生产前沿面。

从纵向来看, 上海市工业领域各行业部分年份的技术效率值如表 4-7 所示。由表 4-7 可知, 自 2000 年以来, 电力、热力、燃气及水生产和供应业(行业 31~33)的技术效率值一直远小于其他行业, 生产点严重滞后于最优产出。总体来看, 制造业(行业 2~30)的技术效率, 大部分年份高于采矿业, 生产点比较接近最佳生产前沿面。

表 4-7 海市工业行业的技术效率测算值

代号	行业名称	2000	2005	2010	2011	2012	2013
1	采矿业	0.84	0.95	0.61	0.74	0.68	0.95
2	农副食品加工业	0.89	0.90	0.90	0.88	0.90	0.86
3	食品制造业	0.91	0.89	0.92	0.91	0.90	0.88
4	酒、饮料和精制茶制造业	0.90	0.92	0.93	0.95	0.91	0.87
5	烟草制品业	0.97	0.97	0.92	0.94	0.95	1.00
6	纺织业	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.91
7	纺织服装、服饰业	0.92	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93
8	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	0.91	0.89	0.82	0.84	0.89	0.81
9	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	0.88	0.93	0.90	0.89	0.82	0.78
10	家具制造业	0.81	0.82	0.73	0.74	0.72	0.74
11	造纸和纸制品业	0.94	0.92	0.94	0.90	0.77	0.89

12	印刷和记录媒介复制业	0.81	0.86	0.91	0.92	0.93	0.75
13	文教、工美、体育和娱乐用品制造业	0.90	0.91	0.91	0.90	0.82	0.62
14	石油加工、炼焦和核燃料加工业	0.93	0.94	0.95	0.94	0.89	0.95
15	化学原料和化学制品制造业	0.93	0.93	0.95	0.95	0.94	0.95
16	医药制造业	0.92	0.93	0.93	0.92	0.93	0.91
17	化学纤维制造业	0.95	0.85	0.44	0.37	0.39	0.55
18	橡胶和塑料制品业	0.93	0.92	0.91	0.90	0.91	0.87
19	非金属矿物制造业	0.95	0.94	0.95	0.95	0.94	0.90
20	黑色金属冶炼和延压加工业	0.94	0.93	0.89	0.84	0.83	0.91
21	有色金属冶炼和延压加工业	0.87	0.87	0.92	0.94	0.87	0.87
22	金属制品业	0.88	0.90	0.87	0.86	0.85	0.85
23	通用设备制造业	0.91	0.88	0.87	0.85	0.83	0.76
24	专用设备制造业	0.91	0.84	0.90	0.88	0.84	0.87
25	交通运输设备制造业	0.93	0.88	0.86	0.87	0.83	0.80
26	电气机械和器材制造业	0.90	0.91	0.87	0.86	0.83	0.76
27	计算机、通信和其他电子设备制造业	0.88	0.78	0.55	0.53	0.50	0.53
28	仪器仪表制造业	0.70	0.58	0.65	0.62	0.60	0.51
29	其他制造业	0.89	0.74	0.36	0.28	0.27	0.84
30	废弃资源综合利用业	0.71	0.52	0.87	0.87	0.70	0.68
31	电力、热力生产和供应业	0.42	0.50	0.32	0.37	0.41	0.95
32	燃气生产和供应业	0.28	0.23	0.46	0.54	0.40	0.85
33	水的生产和供应业	0.21	0.21	0.17	0.18	0.18	0.18

从横向来看,图4-3显示了上海市工业各行业在2000~2013年间的平均技术效率,横坐标行业代号与表4-7一致。由图4-3可知,平均技术效率最高的是行业5和行业15,即烟草制品业及化学原料和化学制品制造业,效率值高达0.942。技术效率越高,说明该生产点距离生产前沿面越近,所以上述2个行业距离生产前沿面很近,生产点已接近最优产出。行业31~33即电力、热力生产和供应业,燃气生产和供应业,水的生产和供应业的平均技术效率最低,远落后于其他行业,说明这三个行业距离最佳生产前沿面甚远,技术效率亟待提高。电力、热力、燃气及水生产和供应业之所以技

术效率落后，是因为电力的生产和输送过程中难免会有能量损失、相关生产设备的转化效率较低，若要提高这类行业的技术效率水平，还需从生产技术着手，增加研发投入和技术引进力度，从而减少生产过程中的能量损失，提高相关设备转化效率。

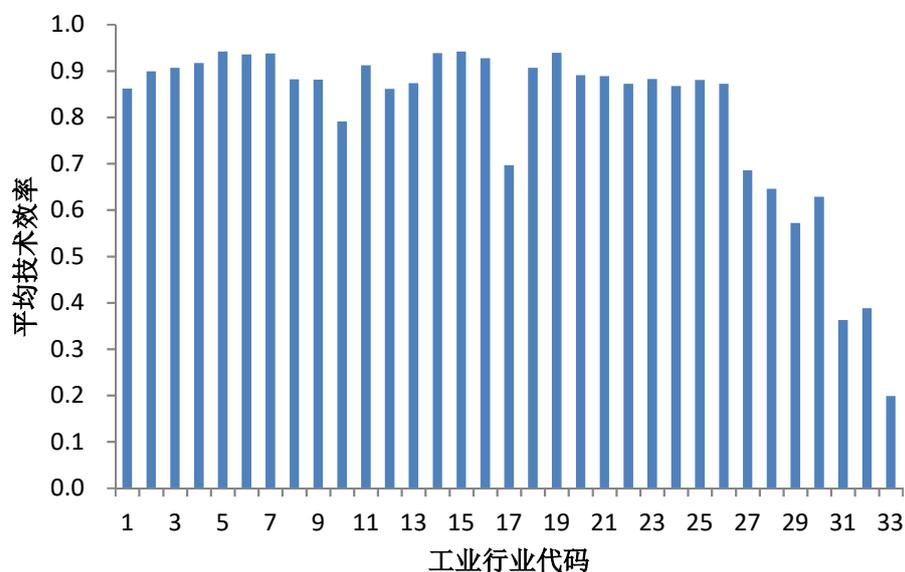


图 4-3 上海市工业各行业 2000~2013 年的平均技术效率

4.3 上海市闵行区工业企业案例分析

4.3.1 SFA 和 DEA 方法对比

同过上述不同方法对中国工业领域、上海市工业各行业能源生产力的比较发现，DEA 和 SFA 得到的结论显现出不一致性。

对于中国工业领域领域能源生产力：

数据包络分析（DEA）的结果表明，1）中国工业领域能源生产力的提高受碳排放、技术进步、资本投入三种因素的推动；2）中国东部沿海工业能源生产力相对较高，西部地区工业能源生产力相对较低，并且在“十二五”期间这种差距有拉大的趋势，反映出中国地区发展的不均衡性；3）能源投入在“十一五”期间对所有经济区域工业能源生产力提高表现为抑制作用，但是到“十二五”期间这种抑制作用减小，并且部分地区表现为促进作用。

随机前沿分析（SFA）的结果表明：1）我国工业能源生产力增长的驱动因素是资本投入和劳动力投入，且劳动力投入的影响大于资本投入的影响；2）而阻碍我国工业能源生产力增长的因素是能源投入和碳排放。

对于上海市各类工业能源生产力:

数据包络分析 (DEA) 的结果表明: 1) 上海制造业能源生产力在 2010~2013 年加速增长, 垄断产业、新兴产业和设备制造业的生产效率较高, 投入资本相对高而产品附加值相对较低的产业生产效率较低; 2) 上海工业能源生产力提高的主要动力源自技术进步、资本投入与碳排放, 劳动力投入与产出结构影响小, 主要阻力为能源投入。

随机前沿 (SFA) 的结果表明: 1) 上海工业中的制造业的能源生产力从 2009 年之后有加速增长的趋势。碳排放对上海制造业能源生产力的提高从 2008 年以来贡献显著。资本投入对上海工业总体能源生产力提高的贡献从 2008 年以来逐渐减小, 而技术进步对上海工业总体能源生产力提高的贡献从 2010 年以来有增大的现象; 2) 上海市工业子行业能源生产力增长的驱动因素是资本投入, 抑制因素是能源投入和碳排放。

两种不同的方法带来的结果不尽相同, DEA 在处理面板数据时, 表现出了该法的缺陷和不足。相对于 SFA, DEA 在处理不同行业时, 有很大的局限性。SFA 较为合适, 可用作对能源生产力进行分解。

4.3.2 上海市闵行工业园区案例分析

为了主动承接市“十三五”规划的发展战略, 突破本地区经济发展的瓶颈, 为未来长远发展奠定稳固根基, 上海闵行区也制定了自身的“十三五”规划纲要, 提出了闵行区自身的“十三五”发展目标^[62]: 整体经济稳定增长, 地区 GDP 年均增长速率达到 6.5% 以上; 优化升级自身的产业结构, 使得第三产业增加值的比重达到 55% 左右等。从闵行区政府制定的发展目标可以看出, 在“十三五”时期闵行区的重心仍旧放在经济发展上, 同时着重调整产业结构, 增加第三产业的在经济产出中所占的比重, 减小工业经济产出的比重。因此, 研究闵行区工业的能源生产力, 分析闵行区工业的经济产出与投入之间的关系及作用机理, 对闵行区实现产业结构调整和经济发展目标有着重要的参考价值。

根据上海市闵行区人民政府网站发布的相关数据, 2015 年, 实现地区生产总值 1964.71 亿元, 比上年增长 6.6%。2015 年, 闵行区生产总值中第一、第二和第三产业增加值的比例为 0.1:51.6:48.3。由此可见, 第二产业是闵行区生产总值的主要来源,

工业对闵行区的经济发展起着至关重要的作用。为了探究闵行区工业领域的经济产出与投入要素之间的影响机理，为闵行区的工业发展提供理论参考，本节将以闵行区工业领域的部分企业作为研究对象，基于面板数据建立相应的能源经济系统评价模型。通过上述方法对比，此处选用更有优势的 SFA 法对上海市闵行区的各类工业行业进行能源生产力评价，具体的方法和模型参照 2.3 小节。

(1) 数据处理

考虑到数据的可靠程度与可获得性，选取了 2012~2015 年闵行区 34 个工业企业的相关数据作为样本数据，企业名称用序号替代表示。为获取计算所用数据，课题组前往该园区进行了相关数据调研。经济产出选用各企业的工业总产值数据；由于各企业的资本存量统计数据无法获得，因此选用各企业的生产成本数据表征资本存量；由于碳排放量缺少 2012 年的数据，所以采用 IPCC 提出的以能源消费分类为标志的因素分解方法计算得到 2012 年各企业的碳排放数据。

(2) 模型估计结果

随机前沿模型估计结果见表 4-8 和表 4-9 所示。

表 4-8 闵行区工业企业模型参数估计结果

系数含义	待估系数	系数估计值	标准差	t 比率
常数项	β_0	2.765	1.025	2.696
资本影响因子	β_1	0.238	0.067	3.569
劳动力影响因子	β_2	0.326	0.050	6.511
能源影响因子	β_3	0.068	0.057	1.191
碳排放影响因子	β_4	0.478	0.076	6.321
技术无效率比重	γ	0.736	0.098	7.540

表 4-8 中显示了闵行区工业企业的模型参数估计结果，从表 4-8 来看，模型的总体方差为 0.827，方差值小于 1，表明随机误差项和无效率项的波动幅度都较小。 γ 的值为 0.736，并且在 1% 的显著性水平下显著，说明对闵行区工业企业来说，随机前沿生产函数的误差主要来源于技术无效率项，少部分来自于统计误差等的影响。因此，采用 SFA 模型分析闵行区工业企业的能源经济系统是合理有效的。此外，模型中的所有系数都能通过 1% 的显著性水平检验，且各系数的标准差较小，说明系数估计值具有较高的稳定性和可靠性。

由表 4-8 可知，资本投入对能源生产力的影响系数为 0.238，大于 0，说明资本要素对闵行区工业企业能源生产力的提升有积极的作用。劳动力投入的影响系数为 0.326，说明劳动力对工业企业能源生产力的提升也有积极的作用，且影响程度大于资本投入。能源投入对经济产出的影响系数为 0.068，表明能源投入对闵行区工业企业的经济产出有一定的正向贡献，但是贡献率较小，能源投入对工业企业能源生产力的影响系数为-0.932，说明能源投入对工业企业的能源生产力存在消极影响，且影响程度很大。碳排放量的影响系数为 0.478，表明对闵行区的工业来说，碳排放量的增加会有利于经济产出的增加，同时促进能源生产力的提升。这一点与国家与上海工业领域的结果不同，针对此案例，将碳排放投入项解释为治理环境污染投入的成本更合适而非环境承载能力，这是因为：“环境承载能力”是一个宏观概念，是针对整个国家或整个地区这样的大面积、大范围来讲的，而对于该案例中这样极个别企业来说，这些企业碳排放量的增加并不会对环境承载能力造成明显的影响，环境承载能力对经济产出的影响不灵敏。所以，碳排放量的影响系数为正，代表碳排放量的增加即治理环境污染所投入成本的增加有利于经济产出的增加，同时促进能源生产力的提升。

从各投入要素的影响系数来看，能源消耗对上海市闵行区工业企业能源生产力的影响程度最大，其次为碳排放量、劳动力和资本投入。这一结果与上海市整个工业领域的结果有 1 个显著的差异，即资本要素对能源生产力的影响程度。资本投入对上海市工业整体来说是能源生产力的最大驱动因素，而对闵行区工业能源生产力的驱动作用却不明显，由此可见闵行区的工业企业并非依赖于资本推进。能源要素对闵行区工业企业的经济产出贡献较小，而对企业能源生产力的影响程度却很大，说明减少能耗既可以大幅度提高闵行区工业企业的能源生产力，又不会造成经济产出的急剧减少。所以，要想优化闵行区工业领域的能源-经济-环境系统，急需对工业企业进行节能改造。

（3）行业技术效率分析

由表 4-9 可知，2012 年到 2015 年间，闵行区工业领域的技术效率水平整体较低，生产过程中的技术无效率程度很高，生产点距离最佳前沿面还有很大一段距离。从各企业的技术效率平均值来看，32 号企业的技术效率水平最高，高达 0.915，说明该公司的经济产出已接近最佳前沿面产出即最优产出，其次为 21 号(0.867)、28 号(0.785)。其他企业的平均技术效率均小于 0.5，且其中有 27 家企业的技术效率值低于 0.3。由

此可见，闵行区工业企业中，大部分企业的经济产出还未达到最优产出的一半，技术效率亟待提高。

表 4-9 闵行区工业领域各企业的技术效率

企业代号	企业类型	2012	2013	2014	2015	平均值
1	塑料化工	0.101	0.093	0.086	0.080	0.090
2	包装彩印	0.171	0.161	0.152	0.143	0.157
3	包装彩印	0.200	0.189	0.179	0.169	0.184
4	纺织	0.067	0.062	0.056	0.051	0.059
5	食品饮料	0.301	0.289	0.278	0.266	0.284
6	通用设备制造	0.242	0.231	0.22	0.210	0.226
7	包装彩印	0.168	0.158	0.149	0.140	0.154
8	化学纤维制造	0.067	0.061	0.056	0.051	0.059
9	食品饮料	0.323	0.311	0.3	0.288	0.306
10	食品饮料	0.229	0.218	0.208	0.197	0.213
11	食品饮料	0.183	0.173	0.164	0.154	0.169
12	金属制品业	0.293	0.282	0.27	0.259	0.276
13	其他	0.155	0.146	0.137	0.128	0.142
14	包装彩印	0.232	0.221	0.21	0.199	0.216
15	塑料化工	0.225	0.214	0.204	0.193	0.209
16	食品饮料	0.172	0.162	0.152	0.143	0.157
17	金属制品业	0.092	0.085	0.078	0.072	0.082
18	其他	0.162	0.152	0.143	0.134	0.148
19	塑料化工	0.147	0.138	0.129	0.121	0.134
20	塑料化工	0.15	0.141	0.132	0.124	0.137
21	电子	0.873	0.869	0.865	0.861	0.867
22	纺织	0.089	0.082	0.075	0.069	0.079
23	电子	0.137	0.128	0.12	0.112	0.124
24	通用设备制造	0.449	0.437	0.426	0.414	0.432
25	食品饮料	0.155	0.146	0.137	0.128	0.142

26	包装彩印	0.23	0.219	0.209	0.198	0.214
27	其他	0.129	0.121	0.112	0.105	0.117
28	电子	0.794	0.788	0.782	0.776	0.785
29	塑料化工	0.101	0.094	0.087	0.080	0.091
30	电子	0.33	0.318	0.307	0.295	0.313
31	电子	0.452	0.44	0.429	0.417	0.435
32	电子	0.919	0.916	0.914	0.911	0.915
33	电子	0.157	0.148	0.139	0.130	0.144
34	其他	0.186	0.176	0.166	0.156	0.171

4.4 小结

本章基于柯布—道格拉斯生产函数和 BC (1995) 随机前沿分析模型理论, 构建了本文的主要研究模型。模型采用了改进后的生产函数框架, 引入了能源投入要素和非期望产出碳排放。模型中对随机前沿生产函数的误差项进行了分解, 将煤消耗比重、石油消耗比重、天然气消耗比重和电力消耗比重考虑到技术无效率模型中, 进一步探讨实际产出与最佳前沿面产出之间的差距。

基于上述 SFA 模型, 本章以 2005 年, 2010 年, 2014 年三个年份, 我国各省市工业领域的面板数据为样本, 分别表征“十五”、“十一五”、“十二五”三个时期的各省市工业领域的能源经济情况, 分析了影响中国工业领域能源经济系统的主要因素以及各因素对能源经济系统的影响机理, 同时估算了我国各省市工业领域的技术效率值, 以此来衡量各省市工业领域的实际经济产出距离最佳前沿面产出差距。结果表明, 资本和劳动力要素对中国工业能源生产力的提升有积极作用, 而能耗和碳排放对中国工业能源生产力的提升有消极影响; 能源投入对中国工业能源生产力的影响程度最大, 其次为劳动力、资本投入和碳排放, 劳动力要素对中国工业经济产出仍起主要的贡献作用; 在中国工业领域中, 劳动密集型产业仍占据主导地位, 资本、能耗密集型产业紧随其后, 产业结构发展相对比较均衡。此外, 在“十五”、“十一五”和“十二五”三个时期中, 中国工业领域的要素利用效率相对较高, 实际产出已经接近最佳前沿面产出; 全国共有 17 个省市的工业平均技术效率达到全国平均水平, 平均技术效率水平最高的是上海, 其次为北京, 山西、贵州和安徽三个省份的平均技术效率相对较低; 相比

于“十五”时期，全国大部分省市在“十二五”时期的工业技术效率水平都提升了，只有江苏、新疆、吉林、广东和西藏五个省份的工业技术效率有所下降。

基于 BC (1995) 随机前沿分析模型，以资本存量，劳动力，能源消耗为投入要素，以工业增加值为经济产出，以碳排放量为非期望产出，建立符合上海市工业各行业投入—产出系统现状的生产函数，分析了各投入要素对上海市工业各行业的影响程度。同时，还将误差项进行进一步的分解，得到了以不同种类能源（煤，石油，天然气，电力）消耗比重为主要影响因素的技术无效率模型。采用 2000 年到 2013 年上海市工业领域各行业的面板数据为样本，对随机前沿分析模型进行模型估计，得到的结果如下。资本要素对上海市工业能源生产力的提升有积极的作用，而能源投入和碳排放量对上海市工业能源生产力的提升则有消极作用；资本投入对上海市工业能源生产力的影响程度最大，其次为能源投入、碳排放量，劳动力对能源生产力的影响最小；上海市工业领域中，劳动密集型产业已逐渐被资本、能耗密集型产业所替代。上海市工业领域在 2000~2013 年间的平均技术效率为 0.81，相对于生产前沿面来说，还有 19% 的改善空间；烟草制品业及化学原料和化学制品制造业的平均技术效率最高，意味着在相同的资源投入与碳排放前提下，这两个行业的经济产出最高；自 2000 年以来，电、热、燃气及水的生产、供应业的技术无效率程度极高，生产点严重滞后于最优产出。

此外，本章还以上海市闵行区的 34 个工业企业为研究对象，以 2012 年到 2014 年的面板数据为样本，基于 SFA 模型分析了上海市闵行区工业的投入—产出系统现状。模型估计结果表明：能源消耗对上海市闵行区工业企业能源生产力的影响程度最大，其次为碳排放量、劳动力和资本投入；减少能耗既可以大幅度提高闵行区工业企业的能源生产力，又不会造成经济产出的急剧减少；闵行区工业领域的技术效率水平整体较低，生产过程中的技术无效率程度很高，生产点距离最佳前沿面还有很大一段距离；从各企业的技术效率平均值来看，32 号公司的技术效率水平最高，其经济产出已接近最佳前沿面产出即最优产出，其次为 21 号、28 号；闵行区工业企业中，大部分企业的经济产出还未达到最优产出的一半，技术效率亟待提高。

第五章 上海市工业能源生产力及碳排放预测

为了解决能源-经济-环境之间的矛盾，世界上一些国家已率先制定了能源生产力目标，例如美国和德国。美国能效政策联盟委员会设立的能源生产力目标是^[2]：到 2030 年，美国能源生产力达到 2012 年的两倍。目前，美国相关部门正在研究实现这一目标需采取的措施及实现该目标后的具体收益。这些举动都体现出，美国对未来的能源安全、经济发展等十分重视。因此，为了加强我国的能源安全、抑制环境恶化，提升我国的能源生产力地位，我国也有必要制定具体的能源生产力目标。要想制定合理的、符合我国国情的能源生产力目标，需事先了解：若按照当前的情形发展，我国在未来的能源生产力情况及碳排放量情况。

此处先从上海市出发，对上海市 2020 年的能源生产力及碳排放量进行预测。这将对上海市政府制定未来的能源或经济相关政策提供理论依据，并为其制定未来的发展方向和目标提供参考。

5.1 预测模型设定

为了得到 2020 年上海市工业领域的能源生产力情况和碳排放情况，本章节基于 2000~2013 年上海市工业领域的时间序列总量数据，采用索洛余值法构造上海市工业总量生产函数，以此作为碳排放量的预测模型，较为精确地预测 2020 年上海市工业领域的碳排放总量。

在采用索洛余值法进行分析时，与随机前沿分析法一样，需事先设定生产函数的形式。为了与前文一致，此处仍旧选择改进后的柯布-道格拉斯（C-D）生产函数。已有的研究在采用索洛余值法进行相关分析时，总是以能源投入、资本投入和劳动力投入为输入要素，以经济产出为输出要素，例如王雄、岳意定等(2013)^[23]、史丹等(2008)^[63]等，这些研究忽略了技术要素对能源经济关系的影响，因此本章节将在已有模型的基础上，融入能源生产力的定义，同时将技术因素作为投入要素建立索洛余值模型，探讨上海市工业领域的总量能源生产力及其影响因素，并运用此模型预测 2020 年的上海市的工业碳排放量。

能源生产力的定义式为 $\eta_t = \frac{Y_t}{E_t}$ ，其中： η_t 表示 t 时期的能源生产力，亿元/万吨标

煤； Y_t 表示 t 时期的经济输出即 GDP，亿元； E_t 表示 t 时期的能源输入，万吨标煤。由能源生产力的定义式可知，能源生产力的大小取决于经济输出量和能源输入量，因此影响经济输出或能源输入的因素也会影响能源生产力。本文将从经济输出方面考虑影响能源生产力的主要因素，不再以经济产出为输出要素，而以能源生产力为输出要素，构建上海市工业领域的总量索洛余值模型，预测 2020 年的上海市工业碳排放。很多学者会根据研究需要对这些基本的生产函数加以改进，形成更适合自己研究内容的生产函数。在 Rasche R H (1977) [45]首次将能源要素引入 C-D 函数之后，很多学者在使用 C-D 函数时都会将能源要素作为输入要素，例如 Ghali K H (2004) [64]、李春发 (2014) [65]等。故本章节也将采用引入能源要素后的 C-D 函数。采用回归法估计生产函数的精确性取决于回归方程中的解释变量，而技术进步对能源生产力的影响不可忽略，所以还需在生产函数中引入技术项。本文选择以第三产业的劳动力投入占比作为技术水平的替代变量。除了能源要素和技术要素之外，环境要素对经济产出的影响也不可忽视。为了寻求环境、能源和经济之间的关系，很多学者将碳排放作为环境要素考虑到生产函数中，例如张金灿、仲伟周 (2015) [48]、陈诗一 (2009) [47]。综上，本文的研究模型为：

$$Y_t = AK_t^\alpha L_t^\beta E_t^\gamma STR_t^\delta C_t^\theta \quad (5-1)$$

其中，A表示初始技术水平，为常数； K_t 表示资本存量，亿元； L_t 表示劳动力投入量，万人； STR_t 表示第三产业的劳动力投入占比； α 、 β 、 γ 、 δ 、 θ 分别表示资本、劳动、能源、技术水平、碳排放量的影响因子。把式(5-1)代入式能源生产力定义式，整理后得具体的研究模型：

$$\ln \eta_t = \ln A + \alpha \ln K_t + \beta \ln L_t + \gamma \ln E_t + \delta \ln STR_t + \theta \ln C_t \quad (5-2)$$

本文采用 Frontier4.1 软件估计(5-2)式，从而得到各投入要素的影响因子。根据影响因子估计结果，对等式(5-2)两侧求微分，整理得到：

$$\frac{dA}{A} = \frac{d\eta}{\eta} - \alpha \frac{dK}{K} - \beta \frac{dL}{L} - (\gamma - 1) \frac{dE}{E} - \delta \frac{dSTR}{STR} - \theta \frac{dC}{C} \quad (5-3)$$

资本、劳动、能源、技术、碳排放及全要素生产率对能源生产力的贡献率分别为：

$$\alpha \times (dK/K) / (d\eta/\eta) 、 \beta \times (dL/L) / (d\eta/\eta) 、 (\gamma - 1) \times (dE/E) / (d\eta/\eta) 、 \delta \times (dSTR/STR) / (d\eta/\eta) 、 \theta \times (dC/C) / (d\eta/\eta) 、 (dA/A) / (d\eta/\eta) 。$$

5.2 数据搜集与整理

由于在后续的碳排放预测时，需要采用趋势预测法首先预测个别投入要素在2020年的数值。为了保证预测的精确性和可信程度，采用趋势预测法时样本数据的时间跨度越大越好。所以，本文采用1985年到2013年的样本数据进行个别投入要素的趋势预测，本文在采集样本数据时也将从1985年的数据开始采集。样本数据涵盖五项指标：能源生产力、资本存量、劳动力投入、能源输入及技术进步表征量（即第三产业劳动力投入占比）。各指标的数据选取方法如下。

5.2.1 能源生产力及能源输入

能源生产力 η_t 的相关数据是根据能源生产力的定义计算得到的，其中，上海市工业领域的经济输出数据（ Y_t ）及能源输入（ E_t ）数据来自上海统计年鉴^[66]。需要注意的是， Y_t 采用1978年可比价。在1985年到2013年间，上海市工业能源生产力的各年增长率如图5.1所示。由图5.1可以看出，除个别年份外，能源生产力的增长率都大于零，因此能源生产力总体呈增长趋势；增长率波动幅度较大，波动范围是-6%~12%，说明能源生产力增长不稳定。

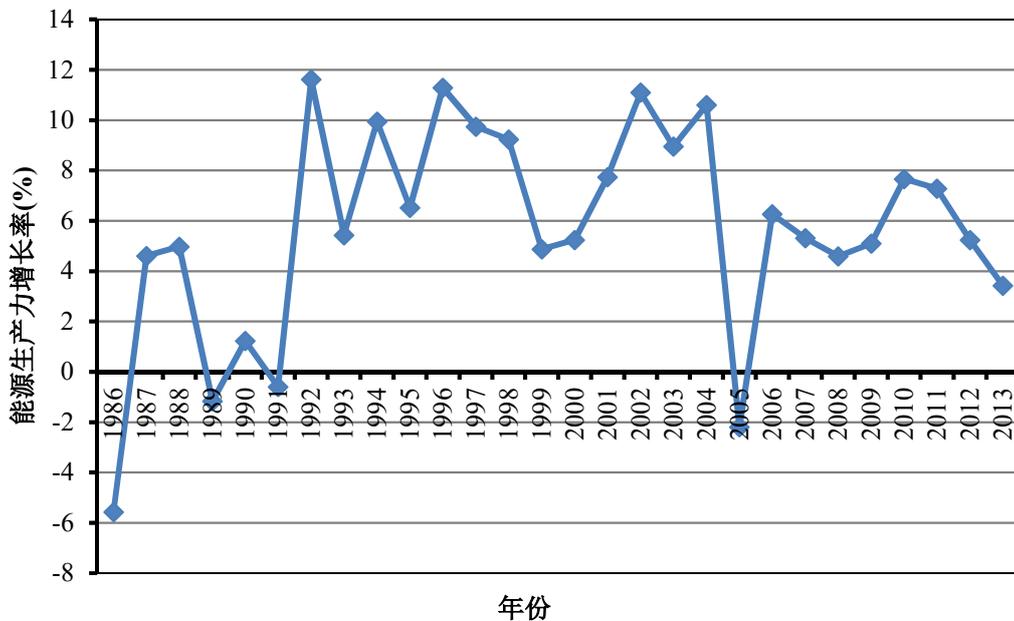


图 5-1 上海市工业能源生产力增长率

5.2.2 资本存量

由于在官方统计资料中无法直接查到上海市工业领域的资本存量数据,因此只能参考相关文献中的数据及研究方法,从而得到本文所需的资本存量数据。目前资本存量的核算方法主要包括直接调查法、固定资产平衡表法和 1951 年 Goldsmith 提出的永续盘存法(PIM 法),其中,永续盘存法已经成为国内外学者估算资本存量时普遍采用的方法^[67]。永续盘存法的公式为:

$$K_t = (1 - \delta_t)K_{t-1} + I_t \quad (5-4)$$

其中 K_t 、 K_{t-1} 分别为第 t 年和第 $t-1$ 年的资本存量, I_t 是第 t 年的新增投资额, δ_t 是第 t 年的折旧率。本文主要参考王桂新^[68]等在《上海市物质资本存量估算:1978~2007》中的数据及研究方法。由于缺乏细化到某一省市且分产业的资本存量数据和相关研究,本文采用王新桂文章表 4 中的第二产业相关数据作为 1978~2007 年的上海市工业领域资本存量,2007 年以后的资本存量估算方法如下。为了与 1978~2007 年的数据保持一致,本文亦采用永续盘存法并使用不变价计算 2007 年以后的资本存量。如何确定以下四个变量是采用永续盘存法估算资本存量的关键,即基期资本存量、固定资产投资价格指数、当年新增投资额和折旧率,不同的学者对这四个变量的处理方法不同。大多数学者以 1952 年或 1978 年为基年来计算基年资本存量,本文选择 1978 年作为基年。采用不变价计算资本存量需要用到固定资产投资价格指数,但是由于缺乏按产业分类的固定资产投资价格指数,所以需要找寻合适的替代指数。常见的替代指数有固定资产价格指数、GDP 平减指数和固定资本形成价格指数等,本文用 GDP 平减指数代替固定资产投资价格指数。当年新增投资额采用上海统计年鉴中“地方固定资产投资主要指标”进行替代,本文选用 6%的固定资产折旧率。具体计算数据见表 5-1 所示。

5.2.3 劳动力投入与技术进步表征量

劳动力投入应综合考虑劳动力数量和劳动力质量。但是,由于劳动力质量与受教育程度等因素有关,而这些因素目前还没有一种较为通用的办法来量化,所以本文采用的劳动力投入数据仅考虑劳动力数量,数据取自上海市统计年鉴^[66]中的职工人数,具体数据如表 5-1 所示。技术进步指标是通过上海市第三产业劳动力投入占比来表征的,同样地,在计算技术水平的替代变量时,也只考虑劳动力数量。计算第三产业劳

动力投入占比时所需要的数据亦来自上海统计年鉴^[66]，具体数据见表 5-1。

表 5-1 上海市工业资本存量和技术进步表征量（1985~2013）

年份	资本存量 (亿元)	技术进步 表征量	年份	资本存量 (亿元)	技术进步 表征量
1985	361.47	0.262	2000	1291.32	0.449
1986	405.95	0.273	2001	1405.59	0.472
1987	457.98	0.282	2002	1528.95	0.488
1988	518.58	0.292	2003	1697.95	0.519
1989	566.08	0.296	2004	1873.1	0.542
1990	612.19	0.296	2005	2044.22	0.556
1991	651.19	0.306	2006	2243.16	0.568
1992	697.74	0.321	2007	2469.36	0.564
1993	750.94	0.326	2008	2843.58	0.55
1994	813.24	0.343	2009	3047.69	0.557
1995	894.87	0.357	2010	3267.48	0.559
1996	1002.18	0.358	2011	3432.17	0.563
1997	1071.60	0.382	2012	3599.68	0.565
1998	1133.82	0.415	2013	3750.27	0.567
1999	1188.45	0.421			

5.2.4 上海市工业领域碳排放

本文 4.1 节中通过计算得到了 2000~2013 年间上海市工业领域各行业的碳排放分量。本章所需的各年份上海市工业碳排放总量数据是通过将每个年份的行业碳排放分量加和得到的。

5.3 索洛余值模型估计与分析

5.3.1 模型估计结果

利用上海市工业领域 2000~2013 年的数据对（5-2）式进行多元线性回归，Frontier4.1 的回归结果见表 5-2。由表 5-2 可知，T 统计量检验结果显示模型中大部分

系数都具有统计显著性。资本存量、劳动力投入和技术进步的影响因子为正，说明这些要素对能源生产力的增长起推动作用；能源消耗及碳排放的影响因子为负，表明其对能源生产力的增长起抑制作用。总体上来看，在 2000~2013 年间，技术进步、能源消耗和资本投入的弹性系数绝对值较大，说明此三者是影响上海市工业能源生产力主要因素，劳动力投入对上海市工业能源生产力的影响程度相对较小。这个结果与第四章的上海市工业领域分行业分析的结果基本一致。因此，为了发展低碳经济，上海市工业领域需要重视节能工作，加大资本投入，并重视技术改进工作。

表 5-2 索洛余值模型系数估计结果

变量	系数	T 统计量
$\ln A$	0.363	0.245
α	0.802	6.272
β	0.127	1.763
$\gamma - 1$	-0.807	-2.735
δ	0.91	3.895
θ	-0.043	-0.309

5.3.2 各投入要素对能源生产力的贡献率分析

为了进一步探究各投入要素对上海市工业能源生产力的影响机制，本文基于上述模型计算得到了各要素对能源生产力的贡献率，具体数据如表 5-3 所示。由表 5-3 可以看出：总体来看，自 2000 年以来，资本投入对上海市工业能源生产力的贡献率基本稳居首位，说明资本要素是能源生产力增长的最大源泉，这一点与分行业分析的结果完全一致；能源投入和技术要素投入对能源生产力的贡献率仅次于资本投入，普遍大于劳动力投入的贡献率。因此，上海市工业领域表现出明显的资本和技术推进型经济增长方式，此外提高能源生产力会对节能工作起到很大的促进作用。2010 年以后，技术要素对能源生产力的贡献率明显降低，说明上海市工业领域出现了轻微的技术停滞现象。全要素生产率对上海市工业能源生产力的贡献率也相对较大，说明除了本文考虑的这些投入要素之外，还有一些其他未考虑到的要素对上海市工业能源生产力有着不可忽视的影响。今后的研究可从这些未考虑的要素入手，进一步探究上海市工业能源经济系统的影响因素。

表 5-3 上海市工业能源生产力中各要素贡献率（单位：%）

年份	资本投入 贡献率	劳动力投入 贡献率	能源投入 贡献率	技术要素投入 贡献率	二氧化碳投 入贡献率	全要素生产 率贡献率
2001	91.70	-14.08	-42.17	60.23	-1.13	5.44
2002	63.43	3.51	-10.46	27.80	-0.27	15.98
2003	99.02	49.34	-71.57	64.57	-1.21	-40.14
2004	78.02	-11.62	-37.84	38.03	-4.10	37.51
2005	-334.38	-52.45	477.79	-107.27	34.05	82.26
2006	124.58	65.95	-67.12	31.35	-15.69	-39.06
2007	152.10	19.80	-99.18	-12.05	-0.20	39.54
2008	264.98	14.76	-50.67	-49.25	1.38	-81.20
2009	112.80	-11.58	33.19	22.70	-3.50	-53.61
2010	75.51	12.77	-96.31	4.27	-6.84	110.60
2011	55.52	72.35	-1.24	8.94	-4.24	-31.33
2012	74.72	21.73	35.73	6.17	-5.91	-32.44
2013	97.89	0.50	-65.42	9.40	16.61	41.03

注：表 5-3 中负号表示该要素会抑制能源生产力的增长，其绝对值的变化方向与能源生产力相反。

5.4 2030 年上海市工业领域相关指标预测

目前，为了应对气候变化，减少碳排放量是全球关注的一大热点。2014 年 11 月，中国曾在《中美气候变化联合声明》中宣布^[69]，我国约在 2030 年达到碳排放量峰值。2015 年 6 月，我国在“中国国家自主贡献”中提出了碳排放目标，即相比于 2005 年，2030 年我国的碳排放强度下降 60-65%。为了实现降低碳排放的目标，我国还发布了《“十三五”控制温室气体排放工作方案》，该工作方案提出：与 2015 年相比，2020 年我国碳排放强度下降 18%，工业领域碳排放强度下降 22%。可见，减少碳排放量已经成为我国的一个迫在眉睫、富有挑战性的任务，而工业是完成这项任务的关键切入点。

“十三五”时期（2016~2020 年），上海承担着到 2020 年基本建成国际经济、金融和贸易中心及创新发展先行者的责任。因此，研究上海市在未来一段时间内的能源、经济及环境发展情况对上海市的发展及国家制定相关发展目标有着重大意义。上海

“十三五”规划纲要中提到，要控制能源消费总量，降低能耗强度和主要污染物排放量。上海市自身并没有进行一次能源的生产，其发展所需的煤、石油、天然气等一次能源基本依赖进口和外省市输入，能源对外依存度极高，能源安全程度较低。工业领域作为一次能源的主要消耗行业，对其未来的能源需求及碳排放情况进行预测对于提高上海市的能源安全程度和完成“十三五”目标有着重要的参考意义。因此，为了明晰在当前的发展态势下，2020年上海市工业领域的能源、经济及碳排放会呈现怎样的状态，也为了给政府制定合理有效的节能减排目标提供参考，本小节将预测2020年上海市工业领域的投入产出情况。此外，此处还将以2020年的预测为基准，探讨2030年上海市工业能源领域的能源生产力及碳排放情况。

对上海市工业领域的能源、资本、劳动力需求及经济发展情况进行预测，不仅能够预测上海市工业领域的能源生产力和碳排放情况奠定基础，还能为发展低碳经济和落实节能减排相关政策提供借鉴。本节首先预测了上海市工业领域的经济产出，能耗、资本、劳动力投入和技术水平，随后在此基础上得到上海市工业领域2020年以及2030年的能源生产力情况，最后结合5.1节中的模型计算得到2020年上海市工业领域的碳排放量。此外，报告还设计了几种不同的情景，比较了2030年上海市工业领域的能源生产力和碳排放。

5.4.1 常用预测方法介绍

能源经济领域常用的预测方法有很多种，根据其特点可以将这些方法分为两大类：第一类是运用历史数据得到待预测变量（即因变量）与待预测变量的影响因素（即自变量）之间的相关关系，且通过查阅文献得到各个自变量在预测时期的预测值，而后将这些预测值作为相关关系的输入从而得到待预测变量的预测值，即相关关系预测法，例如回归分析预测法^[70]和BP人工神经网络预测法^[71]；第二类是分析待预测量的历史数据，采用趋势外推的方法得到待预测量某一时期的预测值，即时间序列预测法，例如GM灰色预测^[72]。本节在预测相关指标时，根据各指标归属性质的不同，主要采用回归分析预测法和时间序列预测法。归属于影响因素即投入要素（碳排放除外）的指标采用时间序列预测法，碳排放采用回归分析预测法进行预测。

回归分析预测法的做法是：基于自变量和因变量之间的相关关系，建立包含各变量的回归方程，此回归方程就是预测用到的模型，主要包括一元和多元回归分析预测

法。一元回归分析预测法中的自变量只有一个，而多元回归分析预测法的自变量至少有两个。回归分析预测法的优点有：形式简单、操作方便，可以较为精确地估算各变量间的相关程度，同时还可检验模型的拟合程度今儿提高预测结果的可信赖度。缺点是在预测时需要事先知道各自变量在预测期的数值，而这些数值往往较难获得。本文在采用此方法预测 2030 年的碳排放量时，首先通过时间序列预测法对索洛余值模型中的资本、劳动力、第三产业劳动力投入占比进行预测，同时通过定义预测 2030 年的能源生产力，最后计算得到 2030 年的碳排放量。

5.4.2 2020 年上海市工业能源生产力预测

在通过定义预测能源生产力时，首先需要知道 2020 年的上海市工业领域的经济产出情况和能源需求情况。本文假设到 2020 年上海市工业领域的经济形势按照“十二五”时期的形势发展。据 1.1.2 小节的数据可知，在“十二五”时期，上海市工业增加值的年均增长率为 4.22%，因此本文采用年均 4.22% 的增长率计算得到 2020 年上海市的工业经济产出，约为 6750 亿元(1978 年不变价)。朱运涛、毛俊鹏、任庚坡等(2016)^[73]对上海市工业能耗做了预测分析，结果显示到 2020 年上海市工业能耗将达到 6215.14 万吨标煤，年平均增长率 0.72%。

通过能源生产力的定义 $\eta_t = Y_t/E_t$ ，计算得到 2020 年上海市工业领域的能源生产力将达到 1.09。2000 年到 2013 年的上海市工业能源生产力情况如图 5-2 所示，自 2000 年以来，上海市工业能源生产力整体几乎呈直线增长趋势，2013 年的能源生产力是 2000 年的 2.18 倍，即在不到十五年的时间里，能源生产力实现了翻倍，说明到 2013 年，上海市的能源经济系统得到了很大程度的优化，在相同的要素投入条件下得到的经济产出大幅度增加。根据上述能源生产力预测结果，2020 年上海市工业领域的能源生产力为 1.09，相比 2013 年增加了 37%。说明按照当前的经济发展和能源消耗形势，2030 年上海市工业领域能源经济系统会得到进一步的优化。

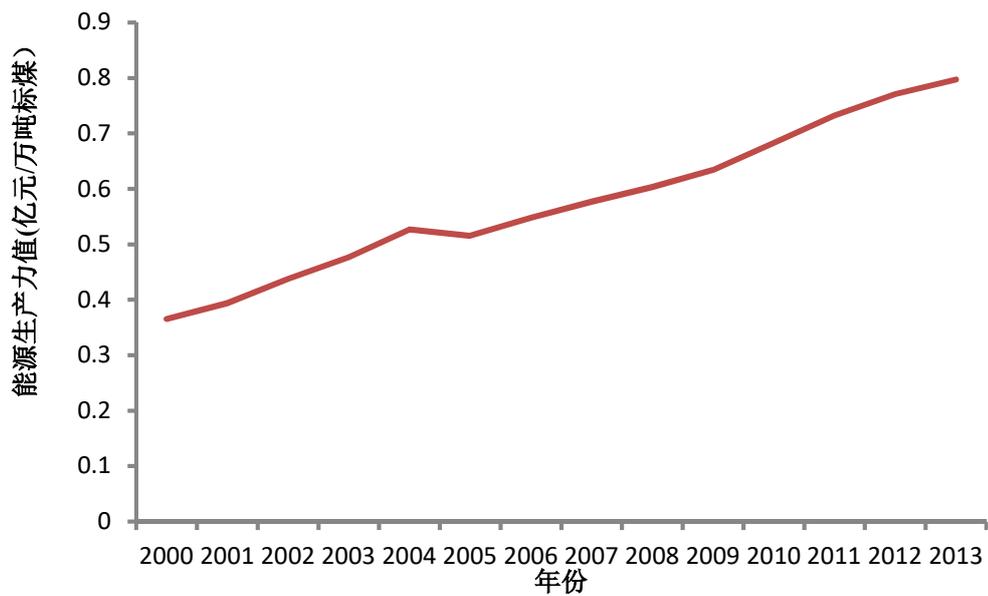


图 5-2 上海市工业领域的能源生产力

能源生产力的提高对于经济的可持续发展及节能、提高能源安全等有着很大的作用，国外一些国家已经开始着眼于提高自身的能源生产力，例如美国。美国能效政策联盟委员会设立的能源生产力目标是^[2]：到 2030 年，美国能源生产力达到 2012 年的两倍。目前，美国相关部门正在研究实现这一目标需采取的措施及实现该目标后的具体收益。这些举动都体现出，美国对未来的能源安全、经济发展等十分重视。因此，为了加强我国的能源安全、提升我国的能源生产力地位，我国也有必要制定具体的能源生产力目标。据预测结果显示，按照当前的发展势头，上海市工业能源生产力在 2020 年能达到 1.09，与 2013 年相比增加了 37%。在制定上海市工业能源生产力目标时，可以以本文的预测结果为基准情景，提出更富有挑战性的、可实现的目标，同时可结合本章 5.3 节的分析结果制定实现该目标的切实可行的途径办法，也可根据本文第四章内容制定针对具体行业的政策，从而达到提高工业能源生产力的目的。

5.4.3 2020 年上海市工业碳排放预测

本文将基于 5.1 小节建立的索洛余值模型，采用回归分析预测法预测 2020 年上海市的碳排放量。在预测碳排放量之前，首先需对索洛余值模型中涉及到的投入要素（资本投入、劳动力投入和第三产业劳动力投入占比）进行预测。

2020 年上海市工业领域的资本投入是基于 2000~2013 年的样本数据，借助 SPSS，通过时间序列预测法预测得到的。预测结果显示，到 2020 年，上海市工业领域的资

本投入规模将达到 4834 亿元。在运用时间序列预测法预测 2020 年的劳动力投入时，最初基于 2000~2013 年的样本数据预测得到的结果几乎为 2013 年的 2 倍，该结果明显较大，不符合上海市的人口发展趋势，也不符合上海市产业结构调整的趋势。造成这种结果的主要原因是：样本数据时间跨度小，只能反映较短时间内的劳动力投入增减特征，无法较为准确且合理地反映上海市工业领域的劳动力投入发展特征。因此，为了得较为合理的劳动力投入预测值，本文采用 1985~2013 年间 29 年的劳动力投入数据作为样本，预测得到 2020 年上海市工业领域的劳动力需求量为 374 万人。该数据比较符合上海市未来的人口发展情况，同时也比较符合上海市放缓工业增速、增加服务业及战略新兴产业的发展趋势。第三产业的劳动力投入占比也是与人口、劳动力相关的指标，为了得到较为合理的预测值，也采用 1985~2013 年间 29 年的数据作为预测用样本。预测结果显示，2020 年上海市工业领域的第三产业劳动力投入占比为 0.64。

在以上预测结果的基础上，预测 2020 年上海市工业领域碳排放所需的回归模型如下：

$$\ln \eta_t = 0.363 + 0.802 \ln K_t + 0.127 \ln L_t - 0.807 \ln E_t + 0.91 \ln STR_t - 0.043 \ln C_t \quad (5-5)$$

式(5-5)是基于 2000~2013 年的上海市工业领域样本数据回归估计得到的。若以碳排放为落脚点，则需采用通过定义预测的能源生产力数据作为自变量，以碳排放为因变量，即需对式(5-5)进行相应变形，变形之后的回归预测模型具体如下：

$$\ln C_t = \frac{0.363 + 0.802 \ln K_t + 0.127 \ln L_t - 0.807 \ln E_t + 0.91 \ln STR_t - \ln \eta_t}{0.043} \quad (5-6)$$

把上述预测得到的 2020 年上海市工业领域的能源生产力、资本投入、劳动力投入、能耗及第三产业劳动力投入占比代入式(5-6)，得到 2020 年上海市工业领域的碳排放量为 6550.54 万吨，碳排放强度为 0.97 万吨/亿元。具体结果及比较数据如表 5-4 所示。

表 5-4 上海市工业碳排放相关指标

年份	碳排放量 (万吨)	碳排放量增长率 (相比 2013 年, %)	碳排放强度 (万吨/亿元)	碳排放强度变化率 (相比于 2013 年, %)
2013	5654.80	-	1.12	-
2020	6550.54	16	0.97	-13.4

由表 5-4 可知，相比于 2013 年，2020 年上海市工业领域碳排放总量增加了 16%，可见到 2020 年，上海市工业领域的碳排放量仍旧呈增长趋势。而 2020 年上海市工业

碳排放强度下降了 26.8%，说明，尽管上海市工业碳排放总量在未来一段时间内仍旧不停地攀升，但是排放单位二氧化碳得到的经济产出也在增加，这意味着到 2020 年，若要获得相同数量的经济产出，上海市工业领域需要付出的环境代价比当前低。

5.4.4 2030 年上海市工业能源生产力和碳排放预测

同上述 2020 年的预测方法类似，本报告在预测 2030 年上海市工业领域能源生产力及碳排放情况时，基于回归预测模型分情景进行预测。为作出合理的预测结果，报告在 2020 年的基础上设置了两种不同的情景，见表 5-5。情景一：假设 2020-2030 年的能源经济形势仍按照历史（当前）发展形势，即工业 GDP 增速为 4.22%，工业能耗增速为 0.72%，劳动力、资本、技术要素亦按照当前趋势发展。情景二：根据国家工业和信息化部印发的《工业绿色发展规划（2016-2020 年）》，到 2020 年实现工业能源消耗增速减缓、能源利用效率显著提升，因此假设 2020 年到 2030 年间工业 GDP 增速为 0.1%，工业能耗增速为-0.97%；另外，由于未来一段时间是上海市制造业处于转型升级的关键时期，低端制造业将逐步退出上海，对于这样一个过渡时期，暂且假设 2030 年上海市的资本、技术要素与 2020 年持平，劳动力要素仍旧按照历史趋势发展。

表 5-5 2030 年上海市工业领域相关数据情景假设

	情景依据	工业 GDP 增速	工业能耗增速
情景一（基准情景）	2020-2030 年继续按照历史（当前）发展形势	4.22%	0.72%
	《工业绿色发展规划（2016-2020 年）》：		
情景二	1.能耗增速放缓	0.1%	-0.97%
	2.能源利用效率提升		
	3.经济增速放缓		

根据表 5-5 的数据以及前述的预测方法，有关上海市 2030 年工业能源生产力和碳排放的结果见表 5-6。

表 5-6 2030 年上海市工业能源生产力和碳排放预测结果

	工业能源生产力 (亿元/万吨标煤)	工业碳排放 (万吨)	单位 GDP 碳排放 (万吨/亿元)
情景一（基准情景）	1.47	8063.305	0.821

若按情景一的推算,按照当前发展形势,2030年上海市工业 GDP 将达到 9817.553 亿元,工业能耗为 6677.41 万吨标煤。根据能源生产力的定义式计算得到 2030 年上海市工业能源生产力将达到 1.47,相比于 2013 年几乎增加一倍。根据时间序列预测法可以得到 2030 年上海市工业领域的资本存量为 6381.976 亿元,劳动力投入为 374 万人,技术要素投入为 0.794。通过回归预测模型计算得到 2030 年上海市工业碳排放为 8063.305 万吨,单位 GDP 碳排放为 0.821 万吨/亿元。

按情景二的推算,2030 年上海市工业 GDP 将达到 6820 亿元,工业能耗为 5636 万吨标煤。根据能源生产力的定义式计算得到 2030 年上海市工业能源生产力将达到 1.21。根据假设,2030 年的上海市工业资本存量为 4834 亿元,技术要素投入为 0.64,另通过时间序列预测法可以得到 2030 年上海市工业领域劳动力投入为 374 万人。通过回归预测模型计算得到 2030 年上海市工业碳排放为 3619.59 万吨,单位 GDP 碳排放为 0.531 万吨/亿元。

表 5-7 上海市工业领域相关指标对比

	工业 GDP 年均增速 (%)	工业 GDP (亿元)	工业能耗增速 (%)	工业能耗 (万吨标煤)	工业能源生产力 (亿元/万吨标煤)	工业碳排放 (万吨)	单位生产总值碳排放 (万吨/亿元)
2013	-	5040.07	-	6322.02	0.80	5654.80	1.12
2020	4.22	6750	0.72	6215.14	1.09	6550.54	0.97
2030 (情景一)	4	9817.55	0.72	6677.41	1.47	8063.31	0.82
2030 (情景二)	0.1	6820	-0.97	5636	1.21	3619.59	0.531

表 5-7 总结了报告预测的 2020 年、2030 年上海市工业领域能源生产力和排放等情况,并将这些指标与 2013 年的相关指标进行了对比,如图 5-3 所示。图中可以看出,相较于 2013 年,三种不同情景下的工业领域生产总值均有所提高,其中 2020 年的工业 GDP 是 2013 年的 1.34 倍,情景一中 2030 年的工业 GDP 是 2020 年的 1.95 倍,情景二中 2030 年的工业水平与 2020 年的值相当,是 2013 年的 1.35 倍。从工业

能耗的角度看，2020 年的工业能耗相比 2013 年有所降低，是 2013 年的 98.3%，而 2030 年的工业能耗相比 2013 年表现不同，情景一中 2030 年工业能耗是 2013 年的 105.6%，情景二中该值是 89.1%。从工业能源生产力来看，三种情景下上海市工业能源生产力均有所提高，其中 2020 年上海市工业能源生产力是 2013 年的 1.36 倍，情景一中 2030 年工业能源生产力是 2013 年的 1.84 倍，情景二中 2030 年的上海工业能源生产力是 2013 年的 1.51 倍。相应的碳排放也表现出不同的结果。2020 年上海市工业碳排放是 2013 年的 1.16 倍，2030 年的工业碳排放结果差异较大，其中情景一种的碳排放是 2013 年的 1.43 倍，而情景二中的工业碳排放则是 2013 年的 64.0%。从单位生产总值碳排放结果来看，三种情景下 2020 年、2030 年上海市工业领域的结果均较 2013 年较低。其中，2020 年的单位生产总值碳排放是 2013 年的 86.6%，情景一中 2030 年的单位生产总值碳排放是 2013 年的 73.2%，情景二中单位生产总值碳排放是 2013 年的 47.4%。可以看出，能源生产力与碳排放没有直接的相关性，能源生产力的变化是多种因素共同作用的结果。总体来看，上海市工业能源生产力在 2020 年、2030 年均会有所提高，若控制得当，相应的碳排放将在 2030 年可实现一定程度的降低。可见，2030 年上海市工业可为国家实现二氧化碳减排承诺作出贡献。

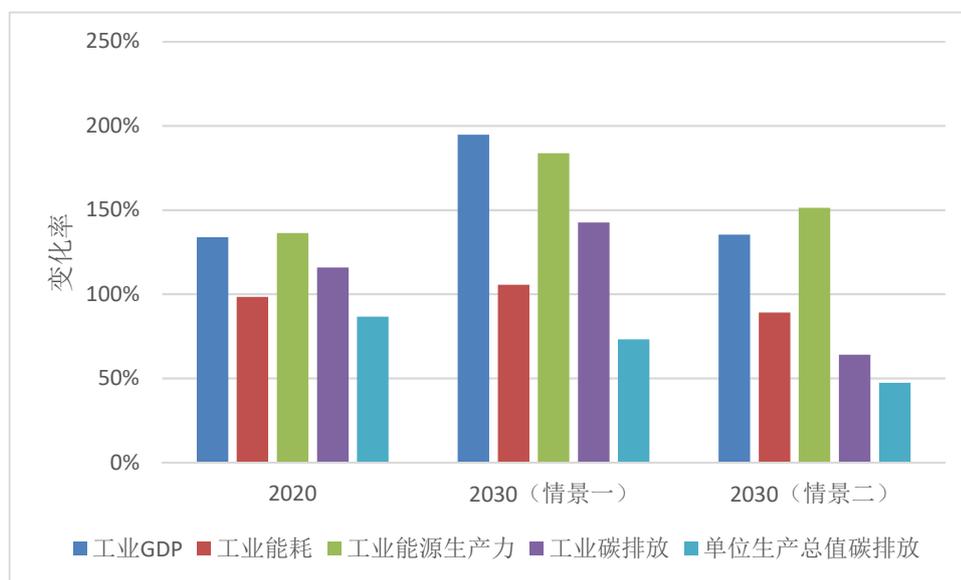


图 5-3 上海市 2020、2030 年相关指标相比 2013 年的变化率

5.5 小结

本章基于 2000~2013 年上海市工业领域的时间序列数据，建立了上海市工业领域的索洛余值总量生产函数模型，并分析了各项投入要素对上海市工业能源生产力的影

响程度及贡献率。结果表明，自 2000 年以来，说明资本要素是能源生产力增长的最大源泉，能源投入和技术要素投入对能源生产力的贡献率仅次于资本投入，普遍大于劳动力投入的贡献率，上海市工业领域表现出明显的资本和技术推进型经济增长方式；2010 年以后，上海市工业领域出现了轻微的技术停滞现象；除了本文已经考虑的投入要素之外，还有一些其他未考虑到的要素对上海市工业能源生产力有着不可忽视的影响。

此外，本章还基于时间序列预测法和回归分析预测法，对 2020 年和 2030 年的上海市工业能源生产力和上海市工业碳排放进行了预测。结果表明，到 2020 年，上海市工业领域的能源生产力达到 1.09，与 2013 年相比增加了 37%。2020 年上海市工业领域的碳排放量为 6550.54 万吨，相比于 2013 年增加了 16%。但是 2020 年的碳排放强度为 0.97 万吨/亿元，相比于 2013 年下降了 13.4%，上海市工业领域单位经济产出的环境成本降低。2030 年，情景一中上海市工业领域的能源生产力为 1.47 亿元/吨标煤，相比 2013 年提高了 83.8%，碳排放为 8063.31 万吨，相比 2013 年增加了 42.6%，单位生产总值碳排放为 0.82 万吨/亿元，相比 2013 年减少了 26.8%；情景二中，上海市工业领域的能源生产力为 1.21 亿元/吨标煤，相比 2013 年提高了 51.3%，碳排放为 3619.59 万吨，相比 2013 年减少了 36.0%，单位生产总值碳排放为 0.53 万吨/亿元，相比 2013 年减少了 52.6%。2030 年上海市工业可为国家实现二氧化碳减排承诺作出贡献。

第六章 主要结论与政策建议

在国际减排指标、世界经济复苏缓慢、中国传统经济增长动力弱化和国内经济进入后工业化阶段的结构改革需求的中国经济大背景下，中国工业领域亟需一系列的结构调整，以适应节能减排背景下的低碳发展要求。上海虽然比全国提早进入后工业化阶段，但并不意味着改革的停止。上海“十三五”规划指出：在当前国际和国内背景下，上海经济的转型升级和改革创新更加刻不容缓。一方面，工业作为推动经济发展的动力产业，自身改革也刻不容缓；另一方面，解决上述能源环境问题的一个有效手段无疑是提高工业能源生产力，在相同能源投入的情况下获得更多的产出。因此用能源生产力指标来衡量工业发展情况，并探讨影响工业领域能源生产力的影响因素具有重要意义。

6.1 主要结论

本报告以中国和上海市工业领域为研究对象，分别用 DEA 和 SFA 法对其进行了能源生产力及其影响因素评价，并选取上海某一工业园区进行典型性分析，最后还预测了 2020 年上海市工业能源生产力的值以及相应的各行业应承担的碳减排任务。得到的主要结论如下：

DEA 法对中国各省市工业能源生产力的研究结果表明：

(1) 中国工业领域能源生产力的提高受技术进步的驱动，当 CO_2 作为投入时，碳排放-能源比对能源生产力的提高起抑制作用。这一方面反映中国工业在考察期间内是通过“高投入，高排放”促能源生产力的提高；另一方面反映这期间内，中国工业通过技术进步来提高能源生产力，而这技术进步部分归功于引进国外技术来更新替代国内技术。

(2) 资本投入对中国工业能源生产力的提高也有重要的促进作用。但在当前国际经济复苏缓慢，国内消费能力有限的情况下，大量投资在中国也出现了产能过剩的问题。

(3) 中国东部沿海工业能源生产力相对较高，西部地区工业能源生产力相对较低，并且在“十二五”期间这种差距有拉大的趋势，反映出中国地区发展的不均衡性。

(4) 能源投入在“十一五”期间对所有经济区域工业能源生产力提高表现为抑制作用，但是到“十二五”期间这种抑制作用减小，并且部分地区表现为促进作用。

DEA 法对上海市各类工业能源生产力的研究结果表明：

(1) 上海工业分行业能源生产力影响因素在时间维度上的大致变化趋势。研究发现上海工业中的制造业的能源生产力从 2009 年之后有加速增长的趋势。碳排放对上海制造业能源生产力的提高从 2008 年以来贡献显著。资本投入对上海工业总体能源生产力提高的贡献从 2008 年以来逐渐减小，而技术进步对上海工业总体能源生产力提高的贡献从 2010 年以来有增大的现象。

(2) 上海工业能源生产力提高的主要动力和主要阻力来源。从工业总体来看技术进步和资本投入对上海能源生产力的提高都起到了促进作用，当 CO₂ 作为投入处理时，碳排放-能源比在一定程度上限制了能源生产力的提高，劳动力投入和产出结构对上海市工业能源生产力的影响较小。能源投入对上海工业中的制造业从 2009 年以来起到重要的促进作用，但是技术效率总体而言对制造业能源生产力提高是抑制作用，并且这种抑制效果从 2010~2013 年更为显著。能源投入对电力、热力、燃气及水生产和供应业能源生产力提高的抑制效果显著，但是技术效率在 2004 年以来对电力、热力、燃气及水生产和供应业能源生产力提高总体是促进作用。

(3) 工业不同行业能源生产力及其影响因素与工业整体的差异。从能源生产力水平方面来看，高附加值工业产业其能源生产力也高。而从能源生产力提高的方面来看，能源密集型工业产业能源生产力提高的主要阻力来源于能源投入、碳排放、技术进步和技术效率。

SFA 的研究结果显示：

(1) 我国工业能源生产力增长的驱动因素。资本投入和劳动力投入对我国工业能源生产力的影响系数分别为 0.439 和 0.541，都大于 0，说明增加资本投入和劳动力投入对中国工业能源生产力的提升有积极作用，二者是我国工业能源生产力的驱动因素。另外，劳动力投入对我国工业能源生产力的影响系数大于资本投入，说明劳动力投入是我国工业能源生产力最主要的驱动因素。

(2) 阻碍我国工业能源生产力增长的因素。能源投入对经济产出的影响系数为 0.315，而对工业能源生产力的影响系数为-0.685，表明通过增加能源投入获得的经济效益无法抵消能耗对能源生产力的削弱作用，故能源投入对能源生产力的影响因子为负数。所以，能耗的增加会阻碍中国工业能源生产力的提升。碳排放量的影响系数为-0.168，小于 0，意味着碳排放量的增加也会阻碍中国工业领域能源生产力的提高。

能源消费影响系数的绝对值大于碳排放,所以能源消费是阻碍我国工业能源生产力的主要因素。

综上,在我国工业领域中,劳动密集型产业仍占据主导地位,资本、能耗密集型产业紧随其后,产业结构发展相对比较均衡。对于中国这样一个劳动力比较充足而资源相对紧缺的国家来说,这种产业发展模式是实现经济可持续发展的必然结果。

(3) 我国工业技术效率状况。在“十五”、“十一五”和“十二五”三个时期中,中国工业领域的平均生产技术效率值为 0.943,投入要素的利用效率相对较高,实际产出接近最佳前沿面产出。在这三个时期中,全国共有 17 个省市的工业平均技术效率达到全国平均水平,平均技术效率水平最高的是上海,其次为北京,山西、贵州和安徽三个省份的平均技术效率相对较低;相比于“十五”时期,全国大部分省市在“十二五”时期的工业技术效率水平都提升了。

(4) 上海市工业子行业能源生产力增长的驱动及抑制因素。资本要素对上海市工业能源生产力的提升有驱动作用,而能源投入和碳排放对上海市工业能源生产力的提升则有抑制作用;资本投入是上海市工业能源生产力增长的主要驱动因素,能源投入是主要的抑制因素。上海市工业领域中,劳动密集型产业已逐渐被资本、能耗密集型产业所替代。

(5) 上海市工业子行业技术效率状况。上海市工业领域在 2000~2013 年间的平均技术效率为 0.81,相对于生产前沿面来说,还有 19%的改善空间。这说明,上海市工业领域的生产过程存在技术无效率,距离最优产出还存在一定差距。自 2000 年以来,电力、热力、燃气及水生产和供应业的技术无效率程度极高,生产点严重滞后于最优产出。而烟草制品业及化学原料和化学制品制造业的平均技术效率最高,即在相同的资源投入与碳排放前提下,这两个行业的经济产出最高。

DEA 和 SFA 两种方法的对比结果表明:

两种不同的方法带来的结果不尽相同,DEA 在处理面板数据时,表现出了该法的缺陷和不足。相对于 SFA,DEA 在处理不同行业时,有很大的局限性。SFA 较为合适,可用作对能源生产力进行分解。

对上海市闵行工业区的典型性分析表明:

能源消耗对上海市闵行区工业企业能源生产力的影响程度最大,其次为碳排放量(即环境治理投入成本)、劳动力和资本投入。对于闵行区的工业企业来说,减少能

耗既能够大幅度提高其能源生产力，又不会造成经济收益的急剧下降。闵行区工业领域的技术效率水平整体较低，生产过程中的技术无效率程度很高，生产点距离最佳前沿面还有很大一段距离。

2030年上海市工业能源生产力和碳排放分析结果：

按照当前的发展情形，到2020年，上海市工业领域的能源生产力将达到1.09，与2013年相比增加了37%。2020年，上海市工业领域的碳排放总量将达到6550.54万吨，相比于2013年增加了16%。但是2020年的碳排放强度为0.97万吨/亿元，相比于2013年下降13.4%，这一数字为制定合理的上海市碳排放目标提供了参考。

2030年上海市工业可为国家实现二氧化碳减排承诺作出贡献。情景一中2030年上海市工业领域的能源生产力为1.47亿元/吨标煤，相比2013年提高了83.8%，碳排放为8063.31万吨，相比2013年增加了42.6%，单位生产总值碳排放为0.82万吨/亿元，相比2013年减少了26.8%；情景二中，2030年上海市工业领域的能源生产力为1.21亿元/吨标煤，相比2013年提高了51.3%，碳排放为3619.59万吨，相比2013年减少了36.0%，单位生产总值碳排放为0.53万吨/亿元，相比2013年减少了52.6%。

6.2 工作展望

发展经济、节约能源和保护环境是当今世界各国共同关注的话题，因此越来越多的国内外学者从事到兼顾环境因素的能源生产力和能源效率的研究当中来。本报告在相关研究基础上，在Shephard函数中加入了副产出CO₂这一生产要素，从而形成了考虑投入、产出和副产出的Shephard推广函数。但是由于生产活动涉及的生产要素众多，生产要素之间关系复杂，目前学术界对于各生产要素之间的关系也还未形成定论，并且作者能力有限、对于本课题的研究时间有限，因此本课题还存在诸多的局限和可以改进的地方：

(1) 在对工业能源生产力在时间维度上的变化时，本报告仅仅描绘了研究年限内工业能源生产力影响因素的大致变化趋势，没有对影响因素随时间变化曲线的函数关系式进行拟合，从而无法对影响因素未来的变化趋势作有根据的预测。

(2) 为了方便和已有研究成果作对比，本报告在对工业能源生产力影响因素的实证研究当中测算的是单产出和单能源投入的生产效率，实际生产活动中往往是多产出、多能源投入的过程，本报告的生产活动模型相对理想化。

(3) 在运用索洛余值法进行各投入要素贡献率分析时发现, 全要素生产率对上海市工业能源生产力的贡献率也相对较大, 说明除了本文考虑的这些投入要素之外, 还有一些其他未考虑到的要素, 例如产业结构等, 对上海市工业能源生产力有着不可忽视的影响。今后的研究可从这些未考虑的要素入手, 进一步探究工业能源经济系统的影响因素。

(4) 从上海市工业领域子行业的技术无效率模型来看, 能耗中煤炭比重、石油比重及天然气比重的增加有助于技术效率的提高, 从而有助于能源生产力的提高; 但是此三者消费比重的增加会带来更多的碳排放, 由于能耗及碳排放都具有负的影响系数, 所以会导致能源生产力降低, 抵消提高技术效率带来的收益。所以, 如何平衡技术效率与碳排放之间的关系将是后续研究的关键点。

经济、能源、环境和其它一些相关因素之间的关系是当今的研究热点之一, 由于这些因素之间关系的复杂性, 课题本身存在着巨大的研究空间。对于上述所列的不足之处, 本报告提出下列有待后续研究解决和拓展问题:

(1) 从本报告的研究成果来看, 已经得到了历年工业能源生产力影响因素的值, 可以以这些数据为基础, 对工业能源生产力影响因素随时间变化的函数关系式进行拟合, 以便于对未来的工业能源生产力及其影响因素进行预测。

(2) 为了和实际生产活动更加相符, 可以考虑采用多产出、多能源投入的 DEA 模型计算生产效率, 并进一步改进 SFA 模式。

(3) 在工业能源生产力影响因素研究模型中, 考查 SO_2 、粉尘、废水等其它副产出对能源生产力的影响, 或者建立考虑多种副产出的 DEA 模型。

6.3 政策建议

根据对中国工业能源生产力影响因素的研究成果, 提出以下建议:

(1) CO_2 高排放意味着传统化石能源的高消耗, 随着化石能源的日益枯竭和国际油价的逐渐上涨, 以及中国面临的“碳减排”压力逐渐加大, 传统“高消耗”的发展方式难以为继, 中国应提高能源生产力, 改革能源投入, 加快新能源技术的研发, 促进新能源替代传统化石能源。

(2) 在改革开放过去的三十多年, 中国工业通过技术引进很大程度地促进了本国工业技术的进步, 也促进了中国工业化的进程。随着中国工业化进程的推进, 中国

需要实现从制造大国向制造强国的转变，走创新的发展道路。因此中国工业技术进步的动力来源也应逐渐转向本国的技术创新，国家应加大对工业领域创新型企业、项目的支持力度，走创新型国家的发展道路。

(3) 资本投入在促进工业能源生产力提高的同时带来了产能过剩的问题，国家一方面应引导合理投资，减少因盲目投资造成的产能过剩，另一方面应提高国内消费能力，消费过剩产能。

(4) 中国东部沿海地区和西部地区工业能源生产力差距拉大趋势，应促进西部地区工业改革，促进东西部地区的工业技术交流，提高西部地区能源生产力，促进东西部地区平衡发展。

(5) 进一步促进能源结构方面的改革，减小能源结构对工业能源生产力的抑制作用，或者增大能源结构对工业能源生产力的促进作用。

根据上海市各类工业能源生产力影响因素研究结果，提出以下政策建议：

(1) 积极推进工业能源结构改革，推广使用非化石能源，提高能源生产力，进一步减小碳排放对能源生产力的约束。

(2) 加快工业产业升级转型，积极寻找工业发展新动力。加大企业技术创新力度，加快企业技术更新，强化技术进步对能源生产力提高的促进作用。提高企业技术效率。

(3) 鼓励高附加值工业产业的发展，加大高附加值工业产业在工业中的比重。

(4) 调整资本要素的投入结构，增加科技型资本投入，从而促进技术进步，以优化经济产出。此外，还需着重改善电力、热力、燃气及水生产和供应业的技术效率。此外，还需着重改善电力、热力、燃气及水生产和供应业的技术效率。

(5) 针对上海市工业领域的碳排放问题，政府相关部门可以结合本文预测的2020和2030年工业能源生产力和工业碳排放情况制定合理有效且富有挑战性的行业能源生产力目标和碳排放目标，为实现“十三五”规划目标作贡献。

附录一

A.1 几个有经济学的术语解释¹

(1) 生产率 (Productivity)

一个企业的生产率定义为企业的产出与投入的比例，即：生产率=产出/投入。当生产过程是单投入、单产出时：可用上式简单计算；当生产过程为多投入、单（多）产出时，则使用一种把多种投入聚合成单一指数的方法，即是用比率测度。

(2) 部分生产率

指的是传统生产率测度方法，如工厂中劳动生产率、发电站燃料生产率、农场土地生产率等。

(3) 全要素生产率 (total factor productivity, TFP)

包含所有生产要素的生产率测度方法。

(4) 生产效率 (Efficiency)

生产率和效率常被频繁使用，而且还经常互换，但遗憾的是这两个术语并不是精确的相同。生产效率不同于生产率，前者无量纲。

(5) 生产前沿面和技术效率

此处以单投入 (x) 和单产出 (y) 的简单生产过程来说明。图 A.1 中的 OF' 线表示的是生产前沿面 (production frontier)，可用来定义投入和产出的关系，表示不同水平的投入可获得最大产出水平。若某企业技术有效，则该企业将在生产前沿面上进行；反之，若企业技术无效，则在生产前沿下部运行。图中点 A 代表无效率，B、C 表示有效率。A 点表示企业处于无效运行状态，因为技术上存在不增加投入的情况下，可将企业产出增加到 B 点。

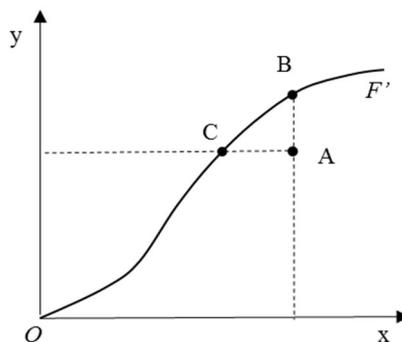


图 A.1 生产前沿面和技术效率

(6) 规模经济、技术效率和生产率的区别

¹ 来源于：(澳)寇里 (Coelli, T. J.) 等著；刘大成译，“效率和生产率分析导论：第 2 版”，北京：清华大学出版社，2009 年 6 月。

图 A.2 阐述了技术效率和生产率的区别，并指出了最佳规模点。生产率即是图中从原点出发的射线的斜率 y/x 。在 A 点运行的企业移动到 B 点，斜率增大，表示 B 点有更高的生产率。当移动到 C 点时，位于该点的射线是前沿面的切线，斜率最大，代表该点是最大可能生产率。C 点即为最优规模点，从其他点到 C 点的移动指的是达到规模经济。由上可知：当一个企业技术有效率时，它依然有可能通过实现规模经济（即达到前沿面上的最优规模点）来提高生产率，但往往企业难以实现运行规模改变，故技术效率和生产率可被设定成长期和短期的定义。

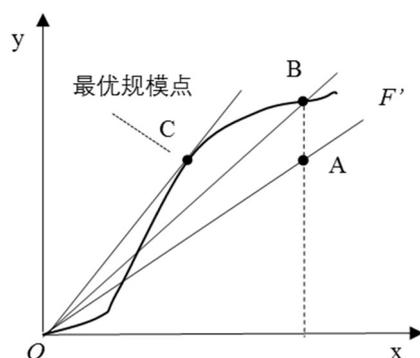


图 A.2 生产率、技术效率和规模经济

(7) 技术进步

当将上述讨论中纳入时间因素进行考虑时，即是比较不同时间的生产率，这就引入了另一个引起生产率变化的因素——技术进步。技术进步可通过生产前沿面的上移来表示。图 A.3 中，技术进步指的是生产前沿面从第 0 时段的 F_0' 移动到第 1 时段的 F_1' 。相较于第 0 时段，在第 1 时段中，对于每个投入水平，企业都会由于技术进步而生产出更多的产出。例如，一个火力发电厂通过安装新燃料炉提高了潜在的生产率，这就是技术进步的实例。

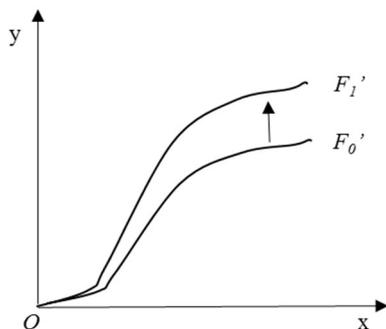


图 A.3 两个时段的技术进步

总结：当一个企业从某一年到下一年提高了生产率时，这种提高不仅仅是来自于（技术）效率的改善，也有可能是因为技术进步或采用规模经济，或是以上 3 各要素共同作用的结果。

参考文献

- [1]. 国家统计局, 中国统计年鉴 2015[M]. 北京: 国家统计局出版社: 2015.
- [2]. 沈镭,刘立涛,王礼茂, etc., 2050 年中国能源消费的情景预测[J]. 自然资源学报, 2015, (03),pp 361-373.
- [3]. BP Statistical Review of World Energy 2016[R]. BP: London, 2016;
- [4]. IEA Key World Energy Statistics 2015[R]. International Energy Agency: Paris, 2015;
- [5]. 中国社会科学院工业经济研究所, 2015 中国工业发展报告[M]. 2015.
- [6]. 王文超. 中国省区能源消费与二氧化碳排放驱动因素分析及预测研究[D]. 博士, 大连理工大学 2013.
- [7]. 中华人民共和国环境保护部 2015 年中国环境状况公报[R]. 环境保护部: 北京, 2016;
- [8]. 国家统计局,环境保护部, 中国环境统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社: 2015.
- [9]. 中华人民共和国环境保护部 2014 年环境统计年报[R]. 环境保护部: 北京, 2015;
- [10]. 王万树,刘建帮, 对政治经济学中生产力概念的思考[J]. 黑龙江教育学院学报, 2000, (6),pp 12-13.
- [11]. 张瑞, 能源-环节-经济中的“倒逼”理论与实证: 环境规制、能源生产力与中国经济增长[M]. 成都: 西南交通大学出版社: 2015.
- [12]. Liao, H.,Du, Y. F.,Huang, Z., etc., Measuring energy economic efficiency: A mathematical programming approach[J]. Applied Energy, 2016, 179 pp 479-487.
- [13]. Energy, A. t. S. The history of energy efficiency[R]. Alliance to Save Energy: 2013;
- [14]. 世界银行, 世界银行数据库. In 世界银行: 华盛顿, 2016.
- [15]. Energy, U. S. D. o. Accelerate Energy Productivity 2030: A Strategic Roadmap for American Energy Innovation, Economic Growth, and Competitiveness. Prepared by Keyser, D.; Mayernik, J., M.; McMillan, C. of National Renewable Energy Laboratory; Agan, J.; Kempkey, N.; Zweig, J. of U.S. Department of Energy.[R]. 2015;
- [16]. KAPSARC Energy productivity: aligning global agendas[R]. King Abdullah Petroleum Studies and Research Center: Riyadh, 2014;
- [17]. Group, R. American energy pProductivity:the economic, environmental and security benefits of unlocking energy efficiency[R]. Alliance to Save Energy: Washington, DC, 2013;
- [18]. 许晓雯, 时鹏将, 基于 DEA 和 SFA 的我国商业银行效率研究[J]. 数理统计与管理, 2006.
- [19]. Lin, B.,Wang, X., Carbon emissions from energy intensive industry in China: Evidence from the iron & steel industry[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 47 pp 746-754.
- [20]. Coelli T J Prasada Rao D S, O. D. C. J., et al., 效率和生产率分析导论(第2版) [M]. 北京: 清华大学出版社: 2009.
- [21]. 何维达, 张远德, 基于非参数随机前沿面模型的高技术产业效率研究[J]. 经济经纬, 2008.
- [22]. 袁晓玲, 张宝山, 杨万平, 基于环境污染的中国全要素能源效率研究[J]. 中国

工业经济, 2009, (2),p 76~78.

[23]. 杨骞, 地区行政垄断与区域能源效率——基于 DEA 方法的省际数据比较[J]. 数量经济技术经济研究, 2010, (9),p 70~75.

[24]. Newman, C.,Matthews, A., The productivity performance of Irish dairy farms 1984–2000: a multiple output distance function approach[J]. Journal of Productivity Analysis, 2006, 26 (2),pp 191-205.

[25]. R.G.Chambers, Y. C., and R.Färe, Profit, Directional Distance Functions, and Nerlovian Efficiency[J]. JOURNAL OF OPTIMIZATION THEORY AND APPLICATIONS, 1998.

[26]. Wang, C., Decomposing energy productivity change: A distance function approach[J]. Energy, 2007, 32 (8),pp 1326-1333.

[27]. Menegaki, A. N., Growth and renewable energy in Europe: Benchmarking with data envelopment analysis[J]. Renewable Energy, 2013, 60 pp 363-369.

[28]. Atallah, T.,Bean, P. Determinants of energy productivity: A comparison of 39 countries[R]. King Abdullah Petroleum Studies and Research Center: Riyadh, 2015;

[29]. Hu, X.,Liu, C., Energy productivity and total-factor productivity in the Australian construction industry[J]. Architectural Science Review, 2016, 59 (5),pp 432-444.

[30]. Zhang, N.,Zhou, P.,Choi, Y., Energy efficiency, CO2 emission performance and technology gaps in fossil fuel electricity generation in Korea: A meta-frontier non-radial directional distance functionanalysis[J]. Energy Policy, 2013, 56 pp 653-662.

[31]. B.W.Ang, F. L. L., Hyun-Sik Chung, A generalized fisher index approach toenergy productivity decomposition analysis[J]. Energy Economics, 2004.

[32]. Zhou, P.,Ang, B. W.,Han, J. Y., Total factor carbon emission performance: A Malmquist index analysis[J]. Energy Economics, 2010, 32 (1),pp 194-201.

[33]. He, G., Benchmarking low-carbon management performance: An empirical study of G20 countries[J]. Actual Problems of Economics, 2012, 137 (11),pp 484-492.

[34]. Wang, C., Differential output growth across regions and carbon dioxide emissions: Evidence from U.S. and China[J]. Energy, 2013, 53 pp 230-236.

[35]. Wang, Q.,Su, B.,Zhou, P., etc., Measuring total-factor CO2 emission performance and technology gaps using a non-radial directional distance function: A modified approach[J]. Energy Economics, 2016, 56 pp 475-482.

[36]. Zhang, N.,Choi, Y., Total-factor carbon emission performance of fossil fuel power plants in China: A metafrontier non-radial Malmquist index analysis[J]. Energy Economics, 2013, 40 pp 549-559.

[37]. Wang, Q. W.,Zhou, P.,Shen, N., etc., Measuring carbon dioxide emission performance in Chinese provinces: A parametric approach[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 21 pp 324-330.

[38]. Zhang, J.,Xing, Z.,Wang, J., Analysis of CO2 Emission Performance and Abatement Potential for Municipal Industrial Sectors in Jiangsu, China[J]. Sustainability (Switzerland), 2016, 8 (7).

[39]. Zhang, N.,Zhou, P.,Kung, C. C., Total-factor carbon emission performance of the Chinese transportation industry: A bootstrapped non-radial Malmquist index analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41 pp 584-593.

[40]. Zhang, N.,Wei, X., Dynamic total factor carbon emissions performance changes in

- the Chinese transportation industry[J]. *Applied Energy*, 2015, 146 pp 409-420.
- [41]. Lin, B., Liu, H., CO₂ mitigation potential in China's building construction industry: A comparison of energy performance[J]. *Building and Environment*, 2015, 94 (P1), pp 239-251.
- [42]. Wang, W., Xie, H., Jiang, T., etc., Measuring the total-factor carbon emission performance of industrial land use in China based on the global directional distance function and non-radial Luenberger productivity index[J]. *Sustainability (Switzerland)*, 2016, 8 (4).
- [43]. 孙广生, 黄祎, 田海峰, etc., 全要素生产率、投入替代与地区间的能源效率[J]. *经济研究*, 2012, (09), pp 99-112.
- [44]. Hu, J. L., Total-factor energy efficiency of regions in China[J]. *Energy Policy*, 2006, 34 (17), pp 3206-3217.
- [45]. 史云鹏. 中国能源消费总量及能源效率研究[D]. 博士, 天津大学 2013.
- [46]. Wang, K., Wei, Y.-M., Sources of energy productivity change in China during 1997–2012: A decomposition analysis based on the Luenberger productivity indicator[J]. *Energy Economics*, 2016, 54 pp 50-59.
- [47]. Chen, X., Qin, Q., Wei, Y. M., Energy productivity and Chinese local officials' promotions: Evidence from provincial governors[J]. *Energy Policy*, 2016, 95 pp 103-112.
- [48]. Wang, C., Sources of energy productivity growth and its distribution dynamics in China[J]. *Resource and Energy Economics*, 2011, 33 (1), pp 279-292.
- [49]. Chang, T. P., Hu, J. L., Total-factor energy productivity growth, technical progress, and efficiency change: An empirical study of China[J]. *Applied Energy*, 2010, 87 (10), pp 3262-3270.
- [50]. Wang, K., Yu, S., Zhang, W., China's regional energy and environmental efficiency: A DEA window analysis based dynamic evaluation[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58 (5-6), pp 1117-1127.
- [51]. Wang, K., Wei, Y. M., Zhang, X., A comparative analysis of China's regional energy and emission performance: Which is the better way to deal with undesirable outputs?[J]. *Energy Policy*, 2012, 46 pp 574-584.
- [52]. Yao, X., Zhou, H., Zhang, A., etc., Regional energy efficiency, carbon emission performance and technology gaps in China: A meta-frontier non-radial directional distance function analysis[J]. *Energy Policy*, 2015, 84 pp 142-154.
- [53]. Yang, M., Yang, F., Energy-Efficiency Policies and Energy Productivity Improvements: Evidence from China's Manufacturing Industry[J]. *Emerging Markets Finance and Trade*, 2016, 52 (6), pp 1395-1404.
- [54]. Duan, N., Guo, J. P., Xie, B. C., Is there a difference between the energy and CO₂ emission performance for China's thermal power industry? A bootstrapped directional distance function approach[J]. *Applied Energy*, 2015.
- [55]. Hu, H., Li, X., Yang, F., etc., Total Factor Productivity and Energy Intensity: An Empirical Study of China's Cement Industry[J]. *Emerging Markets Finance and Trade*, 2016/06/02, 2016, 52 (6), pp 1405-1413.
- [56]. Du, K., Huang, L., Yang, Z., Understanding industrial energy productivity growth in China: a production-theoretical approach[J]. *Energy Efficiency*, 2014, 8 (3), pp 493-508.
- [57]. Wu, J., Xiong, B., An, Q., etc., Total-factor energy efficiency evaluation of Chinese

industry by using two-stage DEA model with shared inputs[J]. *Annals of Operations Research*, 2015.

[58]. Duan, N.,Guo, J.-P.,Xie, B.-C., Is there a difference between the energy and CO2 emission performance for China's thermal power industry? A bootstrapped directional distance function approach[J]. *Applied Energy*, 2016, 162 pp 1552-1563.

[59]. Choi, Y.,Zhang, N.,Zhou, P., Efficiency and abatement costs of energy-related CO2 emissions in China: A slacks-based efficiency measure[J]. *Applied Energy*, 2012, 98 pp 198-208.

[60]. Du, K.,Huang, L.,Yang, Z., Understanding industrial energy productivity growth in China: a production-theoretical approach[J]. *Energy Efficiency*, 2015, 8 (3),pp 493-508.

[61]. 上海市统计局, 上海统计年鉴 2015[M]. 上海: 上海市统计局: 2016.

致谢

感谢能源基金会对本项目提供资助，本报告不代表能源基金会的观点。

特别感谢能源基金会工业节能项目团队何平主任、桑晶女士以及来自 Alliance to Save Energy 的 Karen Hughes 女士在项目设计、执行阶段给予的积极帮助与支持！感谢上海市节能监察中心、闵行区经委、Alliance to Save Energy 等机构专家的支持！

报告免责声明

本研究报告由上海交通大学撰写，研究报告中所提供的信息仅供参考。本报告依靠公开、合法渠道获得相关数据和信息，并尽可能保证可靠、准确和完整。本报告不能作为本研究机构承担任何法律依据或者凭证，对于本报告所提供信息所导致的任何直接的或者间接的后果不承担任何责任。如引用、发布本报告，需注明出处，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。本报告之声明及其修改权、更新权及最终解释权均归上海交通大学所有。

