

136

# 博士学位论文

## 基于 LMDI 的我国二氧化碳排放影响因素研究

学 院	<u>管理学院</u>
研 究 生	<u>徐军委</u>
年 级	<u>博 2010-1 班</u>
专 业	<u>管理科学与工程</u>
导 师	<u>王立杰 教授</u>

中国矿业大学（北京）

2013 年 4 月



# 博士学位论文

## 基于 LMDI 的我国二氧化碳排放影响因素研究

学 院	<u>管理学院</u>
研 究 生	<u>徐军委</u>
年 级	<u>博 2010-1 班</u>
专 业	<u>管理科学与工程</u>
导 师	<u>王立杰 教授</u>

中国矿业大学（北京）

2013 年 4 月

# 研究生毕业论文

中国矿业大学（北京）  
2013 年 4 月

分类号: X24

密 级: 公 开  
单位编号: 11413

## 博士学位论文

论文题目: 基于 LMDI 的我国二氧化碳排放影响因素研究

英文题目: Study on the factors of China's carbon dioxide  
emissions based on LMDI

研究生姓名 徐军委 年级 博 2010-1 学号 TBP100501010Q

专 业 管理科学与工程 研究方向 管理工程

导 师 姓 名 王立杰 职 称 教 授

论文完成日期 2013 年 4 月 论文答辩日期 2013 年 6 月 11 日

学位授予日期 2013 年 6 月 24 日

中国矿业大学（北京）

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国矿业大学或其他教学机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

签名：徐岸姜 日期：2013.6.20

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国矿业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅或借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签名：徐岸姜 导师签名：王峰 日期：2013.6.23

## 摘 要

本文研究以现代管理学、能源经济学、统计学、低碳经济理论、指数分解理论、灰色系统理论、随机过程理论、优化理论为基础,采用定性分析与定量研究相结合的方法,以我国二氧化碳排放现状为依据,首先,估算并建立了我国能源活动和工业生产活动二氧化碳排放清单,且对二氧化碳排放的区域和行业特征进行分析;其次,运用指数分解原理借助 LMDI 模型系统分析了我国二氧化碳排放增长影响因素,并对影响因素进行分类研究;第三,在考虑经济发展速度和能源消耗量等约束条件下,构建了灰色系统和马尔科夫链组合预测模型,并采用该方法预测了我国未来十年的能源消费结构和产业结构,然后结合我国政府承诺的碳强度约束目标对其进行优化调整,并分析了目标实现的可能性,最后结合以上分析对我国二氧化碳减排对策进行了研究。

**关键词:** 二氧化碳排放; 指数分解; LMDI; 能源结构优化; 碳强度

---

## Abstract

The dissertation is on the basis of Management, Energy Economics, Statistics, the theory of low-carbon economy, the index decomposition theory, gray system theory, the theory of stochastic processes, optimization theory, using the combination methods of qualitative analysis and quantitative research, based on the Status of China's carbon dioxide emissions. Firstly, this dissertation estimated and established the CO<sub>2</sub> emissions inventory of China's energy and industrial processes, and analysed regional and industry characteristics of China's carbon dioxide emissions. Secondly, by the use of the index decomposition theory and the LMDI model, this dissertation systematically analyzed influencing factors of the growth of China's carbon dioxide emissions, and conducted these factors into classification. Thirdly, in consideration of the the economic development and energy consumption, this dissertation constructed the combination forecasting model, predicted the China's energy consumption structure and industrial structure for the next decade, And then combined with the commitment of my Government's objectives to optimize the predictive value. In the end, this dissertation analyzed our country's carbon dioxide emission reduction countermeasures.

**Keywords:** Carbon dioxide emissions, Index decomposition, LMDI, Energy structural optimization, Carbon intensity

## 详细摘要

二氧化碳排放问题目前已成为国际社会普遍关注的重大全球性问题,它不仅会对全球环境和生态产生重大影响,而且还与人类社会的生产、消费和生活方式等社会经济诸多领域息息相关。1992年5月22日联合国政府间谈判委员会就气候变化问题举行谈判,旨在控制大气中二氧化碳、甲烷和其他造成“温室效应”的气体的排放,最终达成《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC),其中明确规定,各缔约方应在公平的基础上,根据它们共同但有区别的责任和各自的能力,为人类当代和后代的利益去保护气候系统,发达国家应率先采取行动对付气候变化及其带来的不利影响。

伴随着我国社会经济的飞速发展,我国工业化和城镇化的进程不断加快,对能源尤其是化石能源的消耗量也在逐年加大,由此所带来的二氧化碳排放量也逐年增多,目前已超过美国成为第一大二氧化碳排放国,这使得我国未来要面临的二氧化碳减排压力不断加大。在这样的国际背景下,对我国二氧化碳排放增长驱动因素的分析 and 研究就显得越来越重要。

本文研究以能源经济学、现代管理学、统计学、指数分解理论、随机过程论、灰色系统理论、优化论为基础,采用定性分析与定量研究相结合的方法,以国内外相关研究成果为基础,剖析了我国二氧化碳排放增长的现状及其形成的原因,并估算了历年能源活动和工业生产活动的二氧化碳排放清单;然后以省级数据为依据运用指数分解法对二氧化碳排放增长影响因素进行分解,并对各主要影响因素进行分析;结合我国减排优化目标,针对上述主要影响因素进行研究,重点对能源结构调整和产业结构调整目标进行优化,在不同的组合情景下对2020年碳强度目标进行测算,并依据测算结果分析了减排目标实现的可能性;最后在综合考虑资源、环境、碳排放控制总量等约束条件下,提出了我国二氧化碳减排的对策和措施,并对分地区分行业的节能减排对策进行研究。

### 论文主要结论如下:

(1) 针对我国二氧化碳排放现状,结合我国发布的《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》,分析得出了我国二氧化碳排放的主要来源是能源活动和工业生产活动;在此基础上,借鉴IPCC提供的估算方法和其他学者的研究成果,本文通过对排放系数进行细分,改进并完善了二氧化碳排放量计算方法,并采用此法对能源活动和工业生产活动中产生的二氧化碳排放量进行计算,得出了相关年份的二氧化碳排放清单,并对我国排放总体情况进行对比分析。

(2) 在对我国二氧化碳排放清单分析的基础上,对我国二氧化碳排放特征进行对比研究,其中主要包括区域特征和行业特征。

根据我国统计年鉴中提供的各省统计数据，结合我国经济区域的划分办法，分别对东部、中部、西部和东北四大地区的排放量数据进行计算，并结合各地区经济的发展现状进行分析，得出了分地区各省份二氧化碳排放比重以及二氧化碳排放趋势图，从而可以直观地看出各地区二氧化碳的排放走势。

按照统计年鉴中的行业分类，分别对农业、工业、建筑业、交通运输业、批发零售餐饮业、生活消费和其他行业等七大类进行分析，得出了我国分行业二氧化碳排放比重。从分析结果可知，工业在历年二氧化碳排放中占比都在 70%以上，是二氧化碳排放增长的主要贡献者；并依据我国对工业的分类，分别对采掘业、制造业以及电力、煤气及生产和供应业三大类进行分析，最后得出制造业排放的二氧化碳量占工业总排放量的 80%以上，是工业二氧化碳排放增长的主要贡献者。

(3) 对我国二氧化碳排放的影响因素进行了分析。结合现状对二氧化碳排放因素进行研究，得出主要的影响因素有人口数量、GDP、能源消费总量、能源消费结构、经济结构、城市化水平、工业化水平、能源强度、技术进步、能源价格、交通工具数量、林业和生态保护建设等，并对各个影响因素进行深入分析。

(4) 采用 LMDI 模型对我国二氧化碳排放影响因素进行分解研究。

对比分析了常用的两种分解方法 Laspeyres 分解法和 Divisia 分解法的基础上，重点介绍了 LMDI 和 AMDI 分解模型，最后选取 LMDI 模型作为本文分解研究的模型。

将我国二氧化碳排放总量分解为国内 30 个省级单位 7 个部门 8 种能源品种二氧化碳排放量的总和，建立了基于 LMDI 的指数分解模型；以 1997-2010 年我国时间序列数据为基准对二氧化碳排放增长进行分解研究，通过运用 MATLAB7.0 和 EXCEL 对模型进行计算，最终得出各个影响因素对我国二氧化碳排放总量增长的贡献率。

对模型的计算结果进行详细分析。通过模型的求解结果对各个时期影响因素进行分析，得出了各个时期对二氧化碳排放增长做出较大贡献的因素，并结合省级分量数据进行解释说明，进而对各种影响因素进行归纳分类，并分别对强度、结构和规模三类效应进行分析。

(5) 通过定性分析和定量研究相结合的方法对二氧化碳减排因素进行分析，并结合碳强度约束目标对减排目标进行优化研究。结合模型定量分析的结果，对各省经济产出、人口比重、能源结构、经济结构和能源强度等主要的影响因素进行定性分析；通过分析确定对能源消费结构和产业结构进行优化调整，并结合我国可再生能源约束目标和经济发展速度，分不同组合情景下对未来碳排放目标进行分析和预测，并对碳排放目标实现的可能性进行研究。

(6) 分别从加强政府调控机制、建立健全节能减排综合机制、优化调整能



源消费结构和产业结构、完善能源价格机制、以及分地区分行业等六个层面对我国二氧化碳减排对策进行研究。

**本论文的主要创新点为：**

（1）根据 IPCC 提出的二氧化碳估算原理，通过对排放系数进行细分，改进了二氧化碳排放量计算模型，估算了能源利用与工业生产中二氧化碳的排放量，建立了 1991-2010 年的二氧化碳排放清单，并分析了二氧化碳排放的区域和行业特征。

（2）运用指数分解法对我国二氧化碳排放增长影响因素进行分解研究；构建了基于 LMDI 的分解模型，通过 MATLAB 和 EXCEL 求解得出了各个影响因素对我国二氧化碳排放增长的贡献率，并详细分析了各个时期的影响因素，且对模型中的影响因素进行分类研究。

（3）基于我国政府承诺的碳强度目标，运用灰色系统理论和马尔科夫链模型分析了不同能源消费结构、产业结构以及经济增长组合情景下，我国碳强度目标实现的可能性。

**关键词：**二氧化碳排放；指数分解；排放清单；LMDI；能源结构优化；产业结构优化；碳强度

## Detailed Abstract

Carbon dioxide emissions is one of the key common concerns of the international community, which would have significant impacts not only on the global environment and ecosystem but also on many other social-economic domains of production, consumption and life-style of the human society. In order to control emissions of atmospheric carbon dioxide, methane and other gases caused the "greenhouse effect", the United Nations Intergovernmental Negotiating Committee negotiated and eventually reached the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, hereinafter referred to as the Convention). It clearly stipulates that all parties to the Convention, on the basis of equity and in accordance with their common but differentiated responsibilities and respective capabilities, should protect the climate system for the benefit of present and future generations of mankind, and the developed countries should take the lead in addressing climate change and its adverse impacts.

Along with China's rapid socio-economic development, the process of China's industrialization and urbanization is accelerating gradually. Energy, especially fossil energy demand is also increasing year by year, and so carbon dioxide emissions have increased every year. Carbon dioxide emissions in China have surpassed the United States to become the world's largest emitter of carbon dioxide, which makes our country to face greater pressure to reduce emissions of carbon dioxide in future. In this international context, the analysis and study of the growth drivers of China's carbon dioxide emissions become increasingly important.

The dissertation is on the basis of Energy economics, modern management science, statistics, index decomposition theory, stochastic process theory, the gray system theory, optimization theory, using the combination methods of qualitative analysis and quantitative research, based on the related research results at home and abroad, analysed the China's carbon dioxide emissions growth status and reasons, and estimated and established the CO<sub>2</sub> emissions inventory of China's energy and industrial processes. Then with the provincial data this dissertation used index decomposition method to study the affecting factors of growth of carbon dioxide emissions, and analyzed the main influencing factors. Combined with the constrained goal, this dissertation made a study on the main influencing factors, focused on optimizing energy structure and industry structure, and then in different combinations of scenarios forecasted the carbon intensity target of 2020, analysed the possibility of achieving goals. Finally, this dissertation put forward a series of Countermeasures on carbon dioxide emissions, and gave some measures according to different regions and different sectors.

**The main conclusions of this dissertation are:**

(1) Combining with the release of "Initial National Communication on Climate Change of the People's Republic of China" and analyzing the status of China's carbon dioxide emissions, this dissertation concluded that China's major sources of carbon dioxide emissions are energy activity and industrial production activities. On the basis of the results of the IPCC and other scholars, this paper proposed the calculation of carbon dioxide emissions, and used this method to calculate the carbon dioxide emissions generated by energy activities and industrial production activities. Then this article established the Carbon dioxide emissions inventory and analyzed comparatively the overall emissions.

(2) Based on the analysis of the carbon dioxide emissions inventory, This dissertation studied comparatively the regional characteristics and industry characteristics of China's carbon dioxide emissions.

According to the data of the China Statistical Yearbook, this dissertation calculated respectively the carbon dioxide emissions of the eastern, central, western and northeastern. Combined with the status quo of the region's economic development, the dissertation came to the proportion of carbon dioxide emissions of sub-regions and provinces, and drew the carbon dioxide emissions trend graph to see visually the trend of carbon dioxide emissions of every region.

In accordance with the classified industry of the China Statistical Yearbook, we calculated the proportion of carbon dioxide emissions in agriculture, industry, construction, transportation, Storage and Post, Wholesale and Retail Trades, Hotels and Catering Services, Household Consumption and others. As can be seen from the results, the industry have accounted for more than 70% of the carbon dioxide emissions each year, is a major contributor to carbon dioxide emissions growth. Then we calculated the proportion of carbon dioxide emissions in mining, manufacturing, electric power, gas and water production and supply. At last, we Came to the conclusion that the manufacturing have accounted for more than 80% of the carbon dioxide emissions each year, is a major contributor to the growth of industrial carbon dioxide emissions.

(3) This dissertation analyzed the influencing factors of China's carbon dioxide emissions, such as population, GDP, total energy consumption, energy consumption structure, economic structure, urbanization level, industrialization level, energy intensity, technological progress, energy prices, the number of transport, forestry and ecological protection and construction, etc., and explained these factors in depth.

(4) This dissertation use the LMDI model to analyze influencing factors of the growth of China's carbon dioxide emissions.

On the basis of the comparative analysis of the Laspeyres decomposition and Divisia decomposition, this dissertation described LMDI and AMDI decomposition model, and finally selected LMDI model as a decomposition research model of this paper.

This dissertation decomposed China's carbon dioxide emissions into the total of carbon dioxide quantity of 30 provinces 7 departments 8 energy varieties, and established the LMDI model. Based on the time series data from 1997 to 2010, by use of MATLAB7.0 and EXCEL studied the LMDI model, and calculated the impact of various factors contribution to the growth rate of China's total carbon dioxide emissions.

Then the dissertation explained the calculation results of the model in detail. By analyzing the results of calculation, we identified the factors which made a larger contribution to the growth of carbon dioxide emissions each period. At last, the dissertation categorized the various factors, and focused on the three types of effects on strength, structure and size.

(5) By the combination of qualitative analysis and quantitative research methods, we analyzed carbon dioxide emission reduction factors, and Optimized it in accordance with the carbon intensity constraint target. Combined with the results of the quantitative research, the dissertation analysed qualitatively the major influencing factors of the provincial economic output, the proportion of population, energy structure, economic structure and energy intensity, and chose the energy consumption structure and industrial structure to optimize. Combined with renewable energy constrained goals and the pace of economic development, the dissertation predicted China's carbon emissions targets of next decade in different combinations scenarios and analyzed the possibility of realizing.

(6) To research the Countermeasures of China's carbon dioxide emissions, six aspects were respectively studied: strengthening government regulatory mechanism; establishing and perfecting energy-saving and emission-reducing integrated mechanism; recalibrating energy consumption structure and industrial structural; improving energy prices mechanism; implementing energy-saving measures according to the difference of industries and regions.

#### **The main innovations of this dissertation are:**

(1) According to the principle of the IPCC's estimates of carbon dioxide, this dissertation improved computational model of carbon dioxide emissions through subdividing the oxidation factor, and used this method to estimate carbon dioxide emissions of the energy activities and industrial production activities, then established the carbon dioxide emissions inventory from 1991 to 2010, verify the reasonableness of this method, and analyzed the carbon dioxide emissions of the different regions and industries.

(2) By using the index decomposition method, the dissertation constructed the LMDI model, and used the software tools such as MATLAB and EXCEL to obtain the contribution rate of each influencing factors. Then analysed the influencing factors of various periods, and made a classification study on these factors.

(3) Combined with the carbon intensity constrained goals of our government,

the dissertation used the grey system theory and Markov chain model to optimize the energy consumption structure and industrial structure, analyzed the possibility of realizing.

**Keywords:** Carbon dioxide emissions; Index decomposition; Emission inventory; LMDI; Energy structural optimization; Industrial structural optimization; Carbon intensity



# 目 录

<b>1 绪 论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 论文研究的背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究综述.....	2
1.2.1 指数分解方法研究综述.....	2
1.2.2 能源预测模型研究综述.....	7
1.2.3 排放清单研究现状.....	9
1.3 论文研究的主要内容和方法.....	10
1.3.1 论文的研究内容.....	10
1.3.2 论文的研究方法.....	12
1.4 论文研究的技术路线.....	13
1.5 本章小结.....	14
<b>2 理论基础 .....</b>	<b>15</b>
2.1 低碳经济理论.....	15
2.1.1 低碳经济的概念.....	15
2.1.2 低碳经济的特征.....	15
2.1.3 低碳经济的发展.....	16
2.1.4 低碳经济与可持续发展理论.....	17
2.1.5 低碳经济与循环经济.....	17
2.2 指数分解法.....	18
2.2.1 指数分解的基本思想和基本形式.....	18
2.2.2 指数分解法的应用.....	19
2.3 灰色系统模型.....	20
2.3.1 灰色系统的概念.....	20
2.3.2 灰色系统的基本原理.....	20
2.3.3 灰色系统模型.....	21
2.4 马尔科夫链.....	23
2.4.1 马尔科夫链定义.....	23
2.4.2 转移概率矩阵.....	24
2.4.3 马尔科夫链的应用.....	25
2.5 本章小结.....	25

<b>3 我国二氧化碳排放清单分析 .....</b>	<b>27</b>
3.1 我国二氧化碳排放现状及排放源分析.....	27
3.2 我国能源活动的二氧化碳排放清单分析.....	28
3.3 我国工业生产活动的二氧化碳排放清单分析.....	33
3.4 我国二氧化碳排放清单分析.....	35
3.5 本章小结.....	37
<b>4 我国二氧化碳排放特征和影响因素分析 .....</b>	<b>39</b>
4.1 我国二氧化碳排放特征分析.....	39
4.1.1 我国二氧化碳排放的区域特征.....	39
4.1.2 我国二氧化碳排放的行业特征.....	42
4.2 我国二氧化碳排放的影响因素分析.....	44
4.3 各主要因素对二氧化碳排放的影响.....	45
4.3.1 人口增长对二氧化碳排放的影响.....	45
4.3.2 经济增长对二氧化碳排放的影响.....	46
4.3.3 能源结构对二氧化碳排放的影响.....	47
4.3.4 工业化对二氧化碳排放的影响.....	49
4.3.5 城市化对二氧化碳排放的影响.....	50
4.3.6 消费模式的变化对二氧化碳排放的影响.....	51
4.3.7 技术进步对二氧化碳排放的影响.....	51
4.3.8 林业与生态保护建设对二氧化碳排放的影响.....	52
4.4 本章小结.....	52
<b>5 基于 LMDI 的指数分解模型的构建研究 .....</b>	<b>53</b>
5.1 模型的选取.....	53
5.1.1 指数分解方法的表达形式.....	53
5.1.2 Laspeyres 分解法 .....	54
5.1.3 Divisia 分解法 .....	55
5.1.4 本文研究方法的选择.....	58
5.2 基于 LMDI 二氧化碳排放因素分解模型的构建 .....	58
5.2.1 模型的建立.....	58
5.2.2 数据的选取及来源.....	62
5.3 模型计算与求解.....	64
5.4 计算结果分析.....	69
5.4.1 对各个时期影响因素进行分析.....	69
5.4.2 对影响因素进行分类研究.....	73

5.5 本章小结.....	77
<b>6 减排目标实现的情景分析 .....</b>	<b>79</b>
6.1 减排影响因素分析.....	79
6.1.1 各省经济产出.....	79
6.1.2 农村人口比重及全国人口数量.....	80
6.1.3 能源结构.....	80
6.1.4 部门结构（产业结构） .....	81
6.1.5 能源消费强度.....	81
6.2 组合情境下减排目标实现分析.....	81
6.2.1 能源消费结构调整优化分析.....	82
6.2.2 产业结构调整分析.....	89
6.2.3 不同组合情景下碳强度目标分析.....	94
6.3 减排对策研究.....	98
6.3.1 加强政府调控机制.....	99
6.3.2 建立健全节能减排综合机制.....	100
6.3.3 优化调整能源结构和经济结构.....	101
6.3.4 完善能源价格机制.....	102
6.3.5 分地区实施减排措施.....	103
6.3.6 对高耗能行业实施相应的减排措施.....	104
6.4 本章小结.....	106
<b>7 结论与展望 .....</b>	<b>109</b>
7.1 主要结论.....	109
7.2 论文的主要创新点.....	110
7.3 研究展望.....	111
<b>参考文献 .....</b>	<b>113</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>121</b>
<b>附 表 .....</b>	<b>123</b>
<b>在学期间参加的科研项目和发表的学术论文 .....</b>	<b>127</b>

# 1 绪论

二氧化碳排放目前已经成为全球关注的热点之一,对于该领域的研究由来已久,最早起源于发达国家,这些国家的工业发展带来的环境污染和温室效应使得国外的学者最早关注这方面的研究,随着中国工业化进程的不断推进,伴随的环境问题也日趋突出,因此二氧化碳排放因素研究才逐渐被国内的学者关注。本课题的研究是基于国际社会对我国二氧化碳排放不断施压的背景下,针对我国二氧化碳排放的现状进行深入分析,选题具有较强的理论和实际意义。

## 1.1 论文研究的背景及意义

### 1.1.1 研究背景

为应对环境变化给人类社会带来的挑战,世界各国已经做出了很多努力。1984年,由世界气象组织(WMO)和联合国环境规划署(UNEP)联合成立联合国政府间气候变化专门委员会(简称IPCC),主要职责是评估有关气候变化问题的科学信息以及评价气候变化的环境和社会经济后果。

2007年,IPCC第27次全会详细批准,关于第四次评估报告各工作组报告中关键研究发现和不确定性的声明达成一致<sup>[1]</sup>。报告中指出:全球平均气温和海温升高、大范围积雪和冰融化以及全球平均海平面上升等现象足以证明气候变暖是明显的。根据1850年以来全球地表温度器测资料,1995-2006年中有11年位列最暖的12个年份之中;全球温度普遍升高,北半球较高纬度地区温度升高幅度较大,在过去的100年中,北极温度升高的速率是全球平均速率的2倍;全球平均海平面在1961-2003年间以每年1.8毫米的平均速度上升,其中1993-2003年平均海平面以每年约3.1毫米的速率上升。所有的观测数据表明自然系统正在受到区域变化的影响,特别是温度升高的影响,而二氧化碳等温室气体浓度的升高是诱发全球变暖的主要因素之一。高速的经济增长已经加速了二氧化碳的排放,碳排放所带来的环境和气候变化等问题也已逐渐引起国际社会的普遍关注<sup>[2]</sup>。

目前世界经济正处于向低碳经济的转型期,而我国也面临着工业化和城市化快速发展的阶段,由于受到传统经济增长方式的影响,我国在经济发展过程中碳排放的增长必将会遭受国际社会更多的质疑,碳排放的压力也会越来越大。据荷兰环境评价部的研究报告显示,中国2007年排放二氧化碳62亿吨,已取代美国成为世界上最大的二氧化碳排放国。这使得世界发达国家纷纷把矛头指向中国,对我国的碳排放总量控制以及承担温室气体减排义务的呼吁也越来越高涨。如果我国以发展中国家的发展权为由拒绝承担二氧化碳的减排责任,多年以来我国致力于树立的“负责任国家”的国际形象和建造的和谐的国际环境将不可避免地受到损害,而且也为我国未来经济的发展带来不必要的阻力。以我国当前所处的发展

阶段以及经济运行情况来看,承担碳减排任务与经济增长目标之间必然会发生冲突。

我国是世界上最大的发展中国家,经济发展迅猛,特别是进入21世纪以来,我国国民经济取得了快速的发展,2010年GDP总量达到58786亿美元,已超过日本成为世界第二大经济体,使得我国在国际上影响力不断提升,逐渐成为国际社会关注的焦点<sup>[3]</sup>。但与此同时,二氧化碳排放总量已经超过美国成为世界第一,这也带来了许多负面的影响,比如资源消耗和浪费严重、碳排放显著增加等等,因此也遭受了更多的指责和批评。随着世界各国对气候环境变化的持续关注,碳排放问题也越来越引起我国政府的重视。

从目前国内的经济运行发展态势分析可知,受前期宏观经济因素的影响,我国宏观经济增长呈温和回落态势,国民经济发展继续保持偏高增长态势。2012年3月,在第十一届全国人大五次会议上,温家宝总理做了政府工作报告。报告提出了2012年经济社会发展的主要预期目标:国内生产总值增长7.5%<sup>[4]</sup>。预计未来一段时间内,我国国民经济仍将保持高速增长,这将加大对能源的需求以及对环境的压力,从而形成放缓我国经济发展的制约因素,成为经济可持续发展的瓶颈。

因此,为应对全球气候变化给人类生存环境带来的挑战,我国应该积极主动地实施节能减排相关措施,转变经济增长方式,在经济稳定增长的同时对碳排放总量进行约束,实现我国经济的可持续发展。

### 1.1.2 研究意义

本文针对我国经济发展中的二氧化碳排放因素进行分析,首先对我国目前的二氧化碳排放源进行分析,然后对我国二氧化碳减排影响因素进行分析,并基于LMDI分解方法对二氧化碳排放增长的影响因素进行分解研究,最后结合我国提出的碳强度目标进行优化研究,并提出相应的对策研究。本文的研究内容对我国下一步实施二氧化碳减排政策和低碳经济发展战略都有重要的理论和实践意义。

## 1.2 国内外研究综述

### 1.2.1 指数分解方法研究综述

指数分解法的基本思想就是把一个目标变量的变化分解成若干个影响因素变化的组合,从而可以辨别各个因素影响程度的大小,即贡献率,从而客观确定出贡献较大的因素。在数据可获取的情况下,把此分解方法逐层进行下去,最终就可以把各种影响因素对目标变量的贡献区分开来。关于指数分解方法的应用,国内外都做了大量的研究,特别是国外对此领域研究较为成熟。

#### (1) 国外研究现状



近年来,随着国际上对二氧化碳排放问题的日趋关注,国内外学者对二氧化碳排放量以及排放因素分析的研究也越来越多,尤其是运用因素分解法对二氧化碳排放进行分析是主流的研究方法。

目前主要有以下一些分解方法:最早可以追溯到1871年Laspeyres提出的以基期价格为权重的指数,当时此法主要被用来处理一些经济问题,比如一个企业产量和价格的变化对该企业销售额的影响,并未广泛应用到能源领域。到上个世纪70年代发达国家出现的石油危机才使人们真正关注能源消费等相关问题,学者试图去研究工业结构的变化对整体能源消费的影响,试图去研究工业能源消费量变化的机理,然后指数分解法才逐步被研究人员采用并应用到能源领域解决现实问题<sup>[5]</sup>。到上世纪80年代,指数分解法的理论体系和应用方法得到不断的发展和完善。随着世界各国对气候变化以及二氧化碳减排问题的日趋关注,国外对指数分解方法的研究也不断深入。

国外对指数分解方法的研究相对较多,也涉及许多领域。1995年Ang<sup>[6]</sup>在撰写的综述性论文中列举了有关指数分解方法相关的50篇研究论文,并于2000年再次对指数分解分析的新进展进行综述,研究论文多达120多篇<sup>[7]</sup>。截止目前,国外相关的研究文献已超过千篇,表1-1列举了2000-2010年来的主要相关文献。

表1-1 2000-2012年指数分解相关研究文献

Table 1-1 Index decomposition literature (2000-2012)

文献作者	年份	国家或区域	应用领域		分解方法		
			Energy	other	LMDI	ADMI	Other
K. Liaskas, G. Mavrotas, M. Mandaraka, D. Diakoulaki <sup>[8]</sup>	2000	European Union		√			√
B.W. Ang, F.Q. Zhang <sup>[9]</sup>	2000		√			√	√
Cheng F. Lee, Sue J. Lin <sup>[10]</sup>	2001	Taiwan	√				√
Johan Albrecht, Delphine François, Koen Schoors <sup>[11]</sup>	2002			√			√
Ki-Hong Choi, B.W. Ang <sup>[12]</sup>	2002			√	√	√	
Rutger Hoekstra, Jeroen C.J.M. van den Bergh <sup>[13]</sup>	2003			√			√
Ki-Hong Choi, B.W. Ang <sup>[14]</sup>	2003			√			√
B.W. Ang, F.L. Liu, Hyun-Sik Chung <sup>[15]</sup>	2004	Korean	√				√
Winfried G. Hallerbach <sup>[16]</sup>	2005			√			√
B.W. Ang <sup>[17]</sup>	2005		√	√	√		
Tae-Hyeong Kwon <sup>[18]</sup>	2005	Great Britain		√			√
Subhes C. Bhattacharyya, Arjaree Ussanarassamee <sup>[19]</sup>	2005	Thailand		√			√
B.W. Ang, N. Liu <sup>[20]</sup>	2006		√	√			

续表1-1

Richard Wood, Manfred Lenzen <sup>[21]</sup>	2006		✓		✓		
Manfred Lenzen <sup>[22]</sup>	2006			✓	✓		✓
D. Diakoulaki, G. Mavrotas, D. Orkopoulou, L. Papayannakis <sup>[23]</sup>	2006	Greece	✓				✓
Wietze Lise <sup>[24]</sup>	2006	Turkey	✓				✓
Yuk-shing Cheng, Sung-ko Li <sup>[25]</sup>	2006	China		✓			✓
B.W. Ang, Na Liu <sup>[26]</sup>	2007		✓				✓
B.W. Ang, Na Liu <sup>[27]</sup>	2007		✓		✓		
B.W. Ang, Na Liu <sup>[28]</sup>	2007			✓	✓		
D. Diakoulaki, M. Mandaraka <sup>[29]</sup>	2007	EU		✓			✓
Shinichiro Okushima, Makoto Tamura <sup>[30]</sup>	2007	Japan	✓				✓
Esteban Fernández, Paula Fernández <sup>[31]</sup>	2008			✓			
Emmanouil Hatzigeorgiou, Heracles Polatidis, Dias Haralambopoulos <sup>[32]</sup>	2008	Greece		✓	✓	✓	
P. Zhou, B.W. Ang <sup>[33]</sup>	2008			✓			✓
Chunbo Ma, David I. Stern <sup>[34]</sup>	2008	China	✓		✓		
B.W. Ang, H.C. Huang, A.R. Mu <sup>[35]</sup>	2009				✓	✓	✓
Katerina Papagiannaki, Danae Diakoulaki <sup>[36]</sup>	2009	Greece Denmark		✓	✓		
Sunil Malla <sup>[37]</sup>	2009	Asia-Pacific and North American		✓	✓		
Ilyoung Oh, Walter Wehrmeyer, Yacob Mulugetta <sup>[38]</sup>	2010	Korea	✓		✓		
Yanli Dong, Masanobu Ishikawa, Xianbing Liu, Can Wang <sup>[39]</sup>	2010	Japan-China		✓			✓
Claudia Sheinbaum, Leticia Ozawa, Daniel Castillo <sup>[40]</sup>	2010	Mexico	✓		✓		
B. Sudhakara Reddy, Binay Kumar Ray <sup>[41]</sup>	2010	India	✓				✓
Gürkan Kumbaroğlu <sup>[42]</sup>	2011	Turkish		✓			✓

续表1-1

William Chung, M.S. Kam, C.Y. Ip <sup>[43]</sup>	2011	Hong Kong	√		√	√	
Isabela Butnar, Maria Llop <sup>[44]</sup>	2011	Spanish		√			√
Elif Akbostancı, Gül İpek Tunç, Serap Türüt-Aşık <sup>[45]</sup>	2011	Turkish		√	√		
Alvydas Baležentis, Tomas Baležentis, Dalia Streimikiene <sup>[46]</sup>	2011	Lithuania	√		√		
Ki-Hong Choi, B.W. Ang <sup>[47]</sup>	2012		√		√		
Colin Wren <sup>[48]</sup>	2012	Europe					√
Bin Su, B.W. Ang <sup>[49]</sup>	2012	China		√	√	√	√
Claudia Sheinbaum-Pardo, Sergio Mora-Pérez, Guillermo Robles-Morales <sup>[50]</sup>	2012	Mexico	√		√		
Tadhg O' Mahony, Peng Zhou, John Sweeney <sup>[51]</sup>	2012	Ireland		√	√		
G.P. Hammond, J.B. Norman <sup>[52]</sup>	2012	UK	√				√

## (2) 国内研究现状

国内对于指数分解法的研究起步相对较晚,大都是从最近几年开始的应用性研究。从所采用的研究方法上看也比较局限,应用最广的就是Divisia和Laspeyser分解法,其他的分解方法应用的相对较少。

从研究的内容上可知,国内学者大都对能源强度变动、二氧化碳排放、能源消费等能源相关领域的课题进行分解研究。近年来,随着国际社会对碳排放问题的日趋关注,国内许多学者对这方面的研究逐渐增多,研究的方法也不断丰富。张明<sup>[53]</sup>基于指数分解方法的基本思想建立了分解模型,定量地研究了中国能源消耗、相关二氧化碳排放和交通部门能源消耗等相关影响因素,并对模型的运算结果进行详细说明;邓晓<sup>[54]</sup>以1980-2007年湖北省统计数据为基础,通过因素分解法分析了经济发展、能源结构及效率对湖北省人均碳排放变化所产生的影响,并提出减少人均碳排放量的相关对策建议;徐国泉<sup>[55]</sup>以能源效率为中心,运用Divisia分解方法对我国的能源强度影响因素进行分解研究,并指出效率因素是促使能源强度下降的决定性因素;贺红兵<sup>[56]</sup>在对碳排放进行分析的基础上,采用了Shapley值分解分析方法对碳排放增长的影响因素进行了无残差的分解分析,并与Laspeyres分解分析方法的结果进行了对比研究;薛勇、郭菊娥、孟磊等<sup>[57]</sup>采用投入产出分解方法对我国1997-2004年二氧化碳排放变动因素进行分解研究,

得出经济增长是二氧化碳变动的主要驱动因素；刘兰翠<sup>[58]</sup>采用了不同的分解方法对我国二氧化碳减排政策进行研究；杨国锐<sup>[59]</sup>结合我国当前的实际情况，采用LMDI方法对我国的低碳经济发展影响因素进行分解研究，并对发展路径进行深入探讨；蔡伟光<sup>[60]</sup>以我国建筑能耗驱动因素为研究对象，运用LMDI方法对影响因素进行定量研究；张纪录<sup>[61]</sup>基于消费角度下碳排放问题，采用结构分解法(SDA)对我国消费过程中间接产生的碳排放进行因素分解分析；聂锐、王迪等<sup>[62]</sup>结合我国二氧化碳排放现状，采用改进的因素分解方法对我国二氧化碳排放变动进行分解分析；国涓<sup>[63]</sup>运用定性与定量分析相结合的方法，对我国能源强度变动的效应和影响因素进行分析，并对能源强度变动的因素进行分解研究；郭朝先<sup>[64]</sup>采用LMDI分解技术对我国碳排放进行研究，并分别从地区和产业层面上进行分解分析；刘俊杰、贾兴梅等<sup>[65]</sup>采用AWD分解模型对我国1978-2008年的碳排放强度变化因素进行分解研究；李志强、王宝山<sup>[66]</sup>采用因素分解模型对山西省1990-2008年二氧化碳排放变动影响因素进行分解，得出经济增长因素呈指数增长，而能源结构和能源效率在碳排放增长方面的抑制作用不断弱化；李艳梅、张雷、程晓凌等<sup>[67]</sup>以我国1980-2007年的碳排放数据为依据，并构建模型对经济总量、产业结构和碳排放强度数据进行分解研究；顾成军、龚新蜀<sup>[68]</sup>从影响因素角度入手，采用LMDI分解方法对新疆维吾尔自治区1999-2009年的碳排放进行分解研究；徐雅楠、杜志平<sup>[69]</sup>在估算1995-2008年我国交通运输业碳排放量的基础上，利用STIRPAT模型对碳排放进行分解研究；雷厉、仲云云、袁晓玲等<sup>[70]</sup>通过构建LMDI分解模型，对我国1995-2008年各地区人均碳排放进行分解研究，并得出人均GDP是碳排放增长变动的决定因素；徐盈之、徐康宁、胡永舜等<sup>[71]</sup>通过运用改进的Laspeyser分解法对1995-2007年我国制造业碳排放的影响因素进行分解研究，并结合脱钩指数得出影响因素具有较强的阶段性特点。

随着近年来对因素分解研究的逐渐深入，关于这方面的研究文献也越来越多，研究的范围也涉及到不同国家、地区以及各个行业，研究的方法也不局限于Divisia和Laspeyser分解法，还有很多成果是结合其他模型进行分解研究，本文在此不再一一列出，只列出一些较有代表性的研究成果，详见表1-2。但从目前已有的文献可以看出指数分解方法大多对总量数据进行分解研究，未能对省一级的数据进行详细分解研究，本文试图从省一级的数据进行分解研究。

表1-2 2006-2012年指数分解方法国内相关研究文献

Table 1-2 Index decomposition literature of China(2006-2012)

文献作者	年份	应用领域		分解方法		
		Energy	other	Divisia	Laspeyser	Other
周勇、李廉水 <sup>[72]</sup>	2006	√				√
徐国泉、刘则渊、姜照华 <sup>[73]</sup>	2006		√	√		
吴巧生、成金华 <sup>[74]</sup>	2006	√			√	
吴巧生、成金华 <sup>[75]</sup>	2006	√				√
康 梅 <sup>[76]</sup>	2006		√			√
查冬兰、周德群 <sup>[77]</sup>	2007		√			√
李凯、李明玉、郁培丽 <sup>[78]</sup>	2007	√				√
李政、付峰、高丹 <sup>[79]</sup>	2008		√			√
李国璋、王双 <sup>[80]</sup>	2008	√		√		
谭忠富、蔡丞恺 <sup>[81]</sup>	2008	√				√
王伟林、黄贤金 <sup>[82]</sup>	2008		√			√
宋德勇、卢忠宝 <sup>[83]</sup>	2009		√			
刘叶、王磊 <sup>[84]</sup>	2009	√		√		
刘红光、刘卫东 <sup>[85]</sup>	2009	√		√		
刘燕娜、洪燕真、余建辉 <sup>[86]</sup>	2010		√	√		
王俊松、贺灿飞 <sup>[87]</sup>	2010					
查冬兰、周德群、周鹏 <sup>[88]</sup>	2010		√	√	√	√
王锋、吴丽华、杨超 <sup>[89]</sup>	2010		√	√		
赵奥、武春友 <sup>[90]</sup>	2010		√	√		
查建平、唐方方、傅浩 <sup>[91]</sup>	2010		√	√		
田立新、张蓓蓓 <sup>[92]</sup>	2011		√			√
李国志、李宗植、周明 <sup>[93]</sup>	2011	√		√		
高彩玲、高歌、田采霞 <sup>[94]</sup>	2011	√		√		
国涓、侯芳凝 <sup>[95]</sup>	2011	√				√
邢璐、单葆国 <sup>[96]</sup>	2011		√	√		
郑慕强 <sup>[97]</sup>	2012	√		√		
贺红兵 <sup>[98]</sup>	2012		√		√	√
宋杰鯤 <sup>[99]</sup>	2012	√		√		
张秋菊、王平、朱帮助 <sup>[100]</sup>	2012	√		√		

### 1.2.2 能源预测模型研究综述

能源是支撑一个国家经济发展的最根本的物质基础,与国民经济的持续发展关系较为密切。如果能对能源的使用量进行合理的规划,这对国民经济的发展将起到很大的促进作用,由此也引出了对能源供需的预测。只有合理科学地对能源供需状况进行预测,才能正确处理好经济发展与能源供需之间的关系。

近年来,随着经济的不断发展,对能源供需量预测逐渐成为学者关注的话题,各国学者采用不同的模型和方法对此做了大量的预测,也得出许多研究成果。能



源系统模型从一开始的建立单目标函数的能源模型到上世纪七、八十年代以后建立大规模的能源系统模型，然后又发展到现有的人机对话，以便更快地制定出适合决策者需求的系统模型<sup>[101]</sup>。对能源的供需量进行预测也越来越侧重组合模型，即把不同的预测方法和模型组合起来形成一种新的方法，既有线性组合方法，更多的则侧重于非线性组合方法<sup>[102]</sup>。组合模型的优点在于做预测时具有较高的精确度，利用组合模型去改变模型的预测精度是行之有效的。

由于受许多因素的影响，与能源系统的中长期预测相比，短期预测的精确度要相对较高，中长期的预测往往很难把握。

### （1）国外研究综述

国外对能源系统的预测大都建立在假设和经济分析的基础之上，并以假设的经济分析条件为基础对能源系统进行预测，然后在执行的过程中根据出现的不同情形对其进行调整和完善。许多学者采用不同的预测方法和模型对不同国家的能源系统进行预测。

R.E. Abdel-Aal<sup>[103]</sup>运用人工神经网络建立的单因素预测模型对能源需求月度数据进行预测；G.J. Tsekouras<sup>[104]</sup>等学者运用非线性多变量回归模型对电力系统中长期的能源需求进行预测；Thomas Mestekemper、Göran Kauermann和Michael S. Smith<sup>[105]</sup>提出一种以天为周期的能源需求预测方法，并对比分析了周期自回归模型和动态因子模型在能源需求预测上的应用；In-Bong Kang<sup>[106]</sup>采用不同的预测模型对美国经济时间序列数据进行多周期预测；Aliyeh Kazemi、Amir Foroughi、A和Mahnaz Hosseinzadeh<sup>[107]</sup>运用多层次模糊线性回归模型对伊朗工业能源需求进行预测；L. Suganthi和Anand A. Samuel<sup>[108]</sup>对能源需求模型进行综述，主要阐述了时间序列模型、回归模型、计量经济模型、分解模型、单位根检验和协整模型、ARIMA模型、专家系统和人工神经网络模型、灰色预测模型、投入产出模型、遗传算法、粒子群优化模型、贝叶斯向量自回归模型、MARKAL模型等等。

### （2）国内研究综述

随着国外对能源问题研究的不断深入，国内也涌现出许多学者对该问题进行研究，他们用各种方法和理论对我国能源系统的相关问题进行大量的分析和预测，并取得了相应的研究成果，其中主要是采用灰色系统模型、BP神经网络、马尔科夫链模型、回归分析法、遗传算法熵值法、ARMA模型等模型进行组合优化分析。

李亮、孙廷容、黄强<sup>[109]</sup>等结合省能源消费的统计数据，考虑能源消费系统的特点，采用灰色系统和神经网络组合方法建立预测模型，并对组合权重进行优化；陶然、蔡云泽、楼振飞<sup>[110]</sup>等对国内外现有的能源预测模型进行分析，在此基础上指出存在的缺陷和不足，并对能源预测建模的关键问题进行了研究；孙爱

存<sup>[111]</sup>把因子分析法引入到我国能源产量预测的模型中进行综合评判,从中选出最佳的预测方法和模型;孙涵、杨普容、成金华<sup>[112]</sup>等建立基于Matlab技术的SVR能源预测模型,结合1985-2008年的能源需求历史数据进行仿真,并预测了2010年和2020年的能源需求量;冯述虎、侯运炳<sup>[113]</sup>利用BP神经网络的基本原理建立了时序-神经网络模型,并对能源产量进行预测;卢奇、顾培亮、邱世明<sup>[114]</sup>等组合运用了灰色预测、神经网络和多元线性回归方法对能源消费系统进行预测,并运用该模型对我国未来20年能源消费系统进行预测;周强<sup>[115]</sup>运用灰色马尔科夫链预测模型对我国每年的能源需求量进行预测;付娟、金菊良、魏一鸣<sup>[116]</sup>等通过对能源需求量的历史数据进行分析,建立了基于遗传算法的能源需求Logistic中长期预测模型,并利用新模型预测了2020年我国能源需求量;王珏、鲍勤<sup>[117]</sup>在分析我国能源需求影响因素的基础上,采用定性和定量相结合的方式建立了基于小波神经网络的模型对我国能源消费量进行分析;秦晋栋<sup>[118]</sup>运用熵值法与灰色系统相结合的方法建立组合预测模型,并运用该模型对湖北省2011-2015年的能源需求量进行预测;谢妍、李牧<sup>[119]</sup>等结合省份的能源消费数据,在灰色系统的基础上引入遗传算法对其进行优化,然后对能源进行预测;索瑞霞、王福林等<sup>[120]</sup>采用灰色系统、三次指数平滑模型和BP神经网络组合优化预测模型对能源消费量进行预测;王会强、胡丹<sup>[121]</sup>等利用ARMA模型和灰色系统预测模型建立了组合优化模型,并对模型的有效性进行分析。

以上提出的多种预测方法和模型,不仅提高了我国能源需求预测的理论水平,还增强了预测的实际应用价值。但能源需求由于受到很多不确定因素的制约,因此如何对中长期能源供需进行预测仍是未来研究的重点和难点所在。而能源的供需预测和经济发展紧密相连,如何选取影响能源供需的主要因素去建立适合中国能源需求的预测模型,也是未来能源经济发展研究的一个亮点<sup>[122]</sup>。

### 1.2.3 排放清单研究现状

#### (1) 国外研究综述

国外对排放清单的研究相对较早,由于研究清单所涉及的数据范围较广,一般情况都是由政府研究机构参与编制排放清单。1969年,加利福尼亚的环境空气资源委员会(Air Resources Board,简称ARB)开始收集空气污染源的相关排放信息,其中包括氮氧化物、一氧化碳等;1993年美国环保局制定了排放清单改进计划,推进了空气污染物排放数据清单标准化的进程,促进了污染源排放清单的发展;欧洲环境开发署(EEA)和美国环保署(EPA)最早提出规范大气污染物清单编制,并修订后作为这两个地区温室气体排放清单编制的标准;曼彻斯特大学开发的机遇交互式计算机系统的清单编制工具“温室气体地区清单协定书(GRIP)”,便于用户在能源供求关系、能源技术利用效率、二氧化碳排放等因素之间进行综合决策;2009年4月,美国发布了《1990-2004年美国温室气体排

放与碳汇清单（The Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2004）》，数据显示了在这十几年间，温室气体排放量增加了15.8%，经济增长了51%。

另外，还有不少学者基于生产模式和消费模式两种编制模式对碳排放清单进行研究。C. Sharma<sup>[123]</sup>等人基于生产视角的生产模式对印度交通部门的温室气体排放清单进行研究，并通过时间序列数据验证了政府提出的一系列政策对温室气体排放量所产生的影响；José M. Baldasano<sup>[124]</sup>等人对1987-1996年巴塞罗那市的温室气体排放清单进行分析，重点分析交通部门、工业和商业活动以及废弃物处理等排放源，并得出了各部门温室气体的排放比例；Shobhakar Dhakal提出了基于需求视角的消费模式下计算城市的碳足迹，把碳减排与能源政策结合起来。

## （2）国内研究综述

我国作为联合国气候变化框架公约（UNFCCC）的缔约方之一，在承担减排义务的同时还要提交信息通报。2004年我国首次完成《国家信息通报》，对我国1994年的温室气体排放量进行初步估算和统计；2010年，我国按照UNFCCC的要求逐步开展第二次国家信息通报的编制工作，并涵盖香港、澳门等地区，预计2013年完成编制工作。

国内许多学者对温室气体排放清单做了大量的研究。蔡博峰<sup>[125][126]</sup>在介绍温室气体研究进展的基础上，从城市温室气体清单研究的思想方法入手，对比分析了城市温室气体清单研究方法，并通过实例研究了城市温室气体的清单研究方法、排放情况和减排对策；顾朝林、袁晓辉<sup>[127]</sup>等分析了我国国家层面温室气体排放清单的编制现状，概述了我国城市温室气体排放清单编制方法的研究进展，并说明城市温室气体清单编制的重要性；杨谨、鞠丽萍、陈彬<sup>[128]</sup>等人以重庆市为例对温室气体排放源和碳汇活动进行分析，通过排放清单方法分析对重庆市温室气体排放现状进行研究，并为重庆市未来的低碳经济发展提供依据；曹国良、张小曳、王丹等<sup>[129]</sup>结合各省的统计数据，计算了生物质燃料燃烧所产生的各种污染物排放清单，并对比污染源排放以及地区分布上存在的差异；谢士晨、陈长虹、李莉等<sup>[130]</sup>采用IPCC提供的估算方法，对上海市能源消费所产生的二氧化碳排放清单进行测算，并对测算结果进行分析。目前对二氧化碳排放清单的编制方法的研究较多，但还未形成较统一的权威的方法，特别是对不同燃料的氧化系数研究的较为笼统，缺乏细分。本文尝试从这个角度入手编制较为详细的排放清单。

## 1.3 论文研究的主要内容和方法

### 1.3.1 论文的研究内容

论文首先对二氧化碳排放相关的模型和方法研究现状进行梳理，并结合所用的一些理论基础知识以及我国二氧化碳排放现状，对我国二氧化碳排放来源进

行分析,其中主要分析能源活动和工业生产活动产生的二氧化碳排放,并建立计算公式对我国近年来二氧化碳排放情况进行估算;接下来结合我国的二氧化碳排放的区域和行业特征分析了二氧化碳排放的影响因素,并阐述了若干主要因素对排放所造成的影响;然后基于指数分解法建立分解模型,运用LMDI方法对我国1997-2010年二氧化碳排放增长因素进行分解研究,并对各个因素进行分类研究;然后对分解模型得出的相关因素进行分析,并结合我国政府提出的减排目标进行优化研究,并根据以上研究的结果提出一系列减排对策;最后对本文所做的研究进行总结和展望。详细研究内容如下:

### (1) 绪论

该部分给出了本文的研究背景及研究意义,结合当前我国二氧化碳排放的现状,提出了本文研究的意义;叙述了本文研究所采用的指数分解法和能源预测模型等相关内容的国内外研究现状;详细阐述了论文研究的主要内容、研究方法以及本文研究的技术路线,最后概括了本章的主要研究内容。

### (2) 理论基础

该章节是本文研究的理论基础。主要阐述了本文研究中所运用的理论基础和方法模型,其中主要包括低碳经济、循环经济、可持续发展理论、指数分解法、灰色系统模型、马尔科夫链等。

### (3) 我国二氧化碳排放清单分析

在国家信息通报的基础上分析了我国二氧化碳的排放现状以及排放来源,确定了本文研究的重点是能源活动和工业生产活动中排放的二氧化碳;然后依据文献所提供的数据,分别估算了两部分所排放的二氧化碳量,最后在估算结果的基础上分析了我国二氧化碳排放的整体情况。

### (4) 我国二氧化碳排放特征和影响因素分析

结合我国二氧化碳排放的现状,着重分析了我国二氧化碳排放的区域和行业特征;然后阐述了我国二氧化碳排放的影响因素,并重点研究了人口增长、经济增长、能源结构、工业化水平、城市化进程、消费模式转变、技术进步和林业与生态保护等因素对二氧化碳排放的影响。

### (5) 基于LMDI的指数分解模型的构建研究

本章首先对指数分解方法进行简单介绍,重点分析了Divisia分解法和Laspeyres分解法的数学表达形式,并以简单的例子说明两者之间的区别所在,然后借鉴国外学者的研究成果,选择了本文要采用的指数分解方法为LMDI分解法,并对该分解方法在应用中出现的“0”值情况进行解释说明;

在国外学者研究成果的基础上,采用LMDI分解法建立了新的分解模型,并

考虑到数据获取的缺失，采用统计年鉴上1997-2010年的我国省级时间序列数据进行分解研究，然后通过Matlab软件实现对模型的计算，得出各省相邻年度之间对全国二氧化碳排放增长的贡献值，并采取同样的方法计算出各个驱动因素的贡献率；

然后根据以上运算结果，着重分析了各个时期各种影响因素对二氧化碳排放增长所作出的贡献，对数据的分析细化到省级数据；最后对以上的各个影响因素进行分类，并重点研究了三类效应对二氧化碳排放增长所做出的贡献。

#### （6）减排目标实现的情景分析

结合前面章节的阐述以及分解模型得出的结果，分析了主要的减排影响因素比如各省经济产出、农村人口比重及全国人口数量、能源结构、产业结构和能源强度对二氧化碳减排造成的影响，并指出了对各个因素实施减排的可行性；

然后结合分析的结果，引入了灰色系统和马尔科夫链组合模型，重点对我国的能源消费结构和产业结构进行优化调整，然后结合我国政府承诺的减排目标研究了不同组合情景下减排目标的实现情况，并对最后的计算结果进行说明，指出了原因所在；

最后针对以上的分解因素分析进行了对策研究，分别从加强政府调控机制、建立健全综合机制、优化产业结构和能源消费结构、完善能源价格机制、分地区分行业地提出一系列相关的建议。

#### （7）结论和展望

总结了全文的研究成果，提出了论文研究的创新点和研究存在的不足之处，并对下一步工作进行展望。

### 1.3.2 论文的研究方法

本文首先分析了我国二氧化碳的排放现状，并对现状进行定量研究，然后结合国家的碳减排目标对影响因素进行分解研究，分析了减排目标实现的可行性，最后结合分解分析的结果研究了减排的对策。

从论文的整体来看，本文研究横跨多学科领域，主要涉及现代管理学、经济学、政策学、指数分解理论、灰色系统理论、随机过程、统计学、优化理论等学科领域，以理论分析为基础，考虑我国政府提出的碳减排目标和实施的减排政策措施等因素，采用定性分析和定量研究相结合，借鉴国内外的研究成果，以理论提升为出发点，以系统论作为支撑，从定量研究入手结合定性分析，以我国的二氧化碳减排对策为最终的落脚点。

本文采用的主要研究方法如下所示：

（1）对比分析方法。本文在计算我国历年二氧化碳排放量时，采用与相关机构的预测结果进行比较，便于说明本文计算方法的有效性和准确性；第五章进



行分解研究时，将多种分解方法进行对比分析，比较之间各自存在的优缺点，然后选取适合本文研究的LMDI开展下一步的研究。

（2）定性分析和定量研究相结合。本文在对二氧化碳排放来源分析、排放影响因素分解研究以及减排目标优化等章节内容时，采用该方法进行研究。

（3）规范分析和实证研究相结合。本文对我国二氧化碳排放来源和影响因素进行分析时，依据经济学等相关理论对排放来源和主要的影响因素进行分析，指出了未来一段时间内我国二氧化碳排放的趋势，然后结合历年的统计数据对二氧化碳排放因素进行实证研究，并结合我国政府提出的碳减排目标找出未来的发展对策。

（4）统计分析方法。在估算二氧化碳排放清单时对分能源品种、分行业 and 分工业品种数据采用EXCEL2010进行计算；采用EXCEL2010和Matlab7.0对历年各省统计数据进行分析 and 计算；另外在计算历年能源结构转变和产业结构转变的概率时再次使用EXCEL2010对统计数据进行了整理和归纳。

#### 1.4 论文研究的技术路线

论文以实现我国二氧化碳减排目标为出发点，运用指数分解方法、灰色系统理论、马尔科夫链模型等理论基础，结合我国二氧化碳排放的现状，对二氧化碳减排因素进行分析，找出主要的影响因素，并针对此提出了相应的对策。

本文的技术路线图如图1-1：

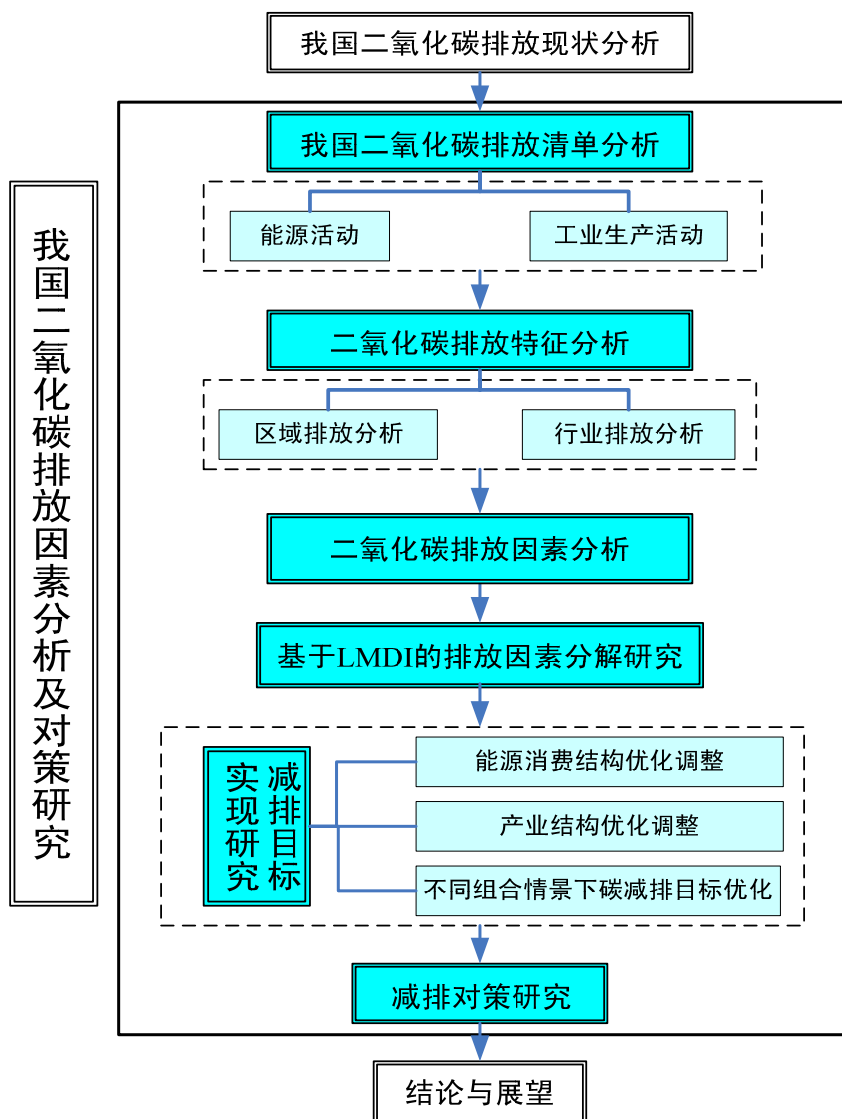


图1.1 论文研究的框架

Figure 1.1 The Framework of Dissertation

## 1.5 本章小结

本章为论文的序言部分，对整个论文起到统领全文的作用。首先介绍了论文的选题背景和研究意义；并在此基础上对指数分解方法、能源预测模型以及排放清单等研究进行综述，分析了在这些方面国内外的主要研究现状；然后对论文研究的主要内容和研究方法进行阐述，并给出了本文研究的框架；最后对本章进行小结。

## 2 理论基础

经济理论是任何一个研究框架的基础,同时在此基础上再辅之以其他相关理论基础。本文对我国二氧化碳排放因素分析及对策研究也不例外,一方面本文以低碳经济理论为基础,阐明了二氧化碳排放因素分析及减排对策研究的必要性和迫切性,另一方面,通过二氧化碳排放清单编制、指数分解法、优化理论、灰色系统理论、马尔科夫链模型等方法 and 模型来实现对二氧化碳排放因素的分析及对减排对策的研究。

### 2.1 低碳经济理论

#### 2.1.1 低碳经济的概念

国内外学者从不同角度对低碳经济的概念和相关理论进行了研究,但其概念及范畴都是大致相同的,目前大多数学者都认同低碳经济是一种以低能耗、低污染、低排放和高效能、高效率、高效益为主要特征,以较少的能耗和污染排放获得较大产出的新的经济发展模式。其实质是保持经济社会高速发展的同时,实现能源、资源的高效利用和发展清洁能源,实现能源的低碳化或者无碳开发;其核心是低碳技术创新、制度创新和发展观的转变;其目标是控制温室气体排放和促进人类的可持续发展;是一场涉及国家权益权衡、价值观念改变、生产生活方式改变的全球性革命。

#### 2.1.2 低碳经济的特征

不同的学者对低碳经济概念的理解也存在不同之处,低碳经济主要是通过提高高碳能源的使用效率,加大清洁能源的使用比率,从而达到降低能耗、减少排放的发展模式,是世界能源消费观的一次彻底转变,也是人类生产生活方式上的一次重要变革。在综合诸多学者研究成果的基础上,本文归纳了低碳经济的特征,概括如下:

(1) 是一个创新性的概念。与传统经济形态相比,低碳经济是一个创新性的概念。传统的经济形态大都是以高排放、高能耗、高污染为代价的,通常以GDP来衡量经济社会的发展程度,并不太注重经济发展的质量以及对环境所造成的破坏;而低碳经济在保证经济快速发展的同时,更强调低污染、低排放、低能耗等特征,这将引发新一轮的技术创新,带来一场技术层面的大变革。

(2) 是一个全局性的概念。低碳经济是一个包含社会、经济、生态环境等多方面综合全局的概念,并非简单的经济技术方面的概念。它存在于社会生产生

活的全过程当中，以经济活动低碳化和能源消费低碳化为主要特点，尽量减少污染物和温室气体的排放，保证在经济发展的同时对生态系统造成最小程度的破坏，实现生态系统与经济社会协调可持续发展。

（3）是一个战略性的概念。环境污染和温室气体排放对气候变化造成了很大的影响，而气候变化给人类发展所带来的影响是长远的。低碳经济是经济社会发展的要求，符合了人类发展的需求，是对当今能源消费方式、经济发展方式和人类生活方式所做的一次全新变革，是人类调节自身活动适应地球生态系统的战略性选择。

（4）是一个全球性的概念。低碳经济并不是单独某个国家自身发展的需求，任何一个国家也不可能去独立面对全球气候变化所带来的挑战，低碳经济的发展是需要全球各国之间互相合作才能实现的。而世界各国发展速度和国情各不相同，因此更需要国际社会互相协作制定出一套被国际社会认同的方案，逐渐减少温室气体排放。这正是多年来各国围绕着气候变化问题展开了一系列的谈判的重要原因之一，就是要达成一个全球性的制度约束框架，如《京都议定书》等。

### 2.1.3 低碳经济的发展

“低碳经济”最早是由英国提出，2003 年英国政府发布了能源白皮书《我们能源的未来：创建一个低碳经济》，旨在到 2050 年将英国二氧化碳排放量在 1990 年的基础上降低 60%，使英国成为一个真正意义上的低碳经济国家。在能源白皮书中，首次提出了“低碳经济”的概念，即在消费较少的能源资源和带来较少的环境污染的情况下，获得更多的经济发展。此后国内外学者纷纷对此进行研究，提出了许多不同的见解。

2006 年，由前世界银行首席经济学家尼古拉斯·斯特恩牵头，经过大量调研完成了《斯特恩报告》，该报告分析了气候变化对社会和环境造成的影响，指出全球每年 GDP 1% 的收入，可以避免未来每年 GDP 5%-20% 的损失，并呼吁全球各国经济向低碳经济转型。

2007 年 6 月，中国政府制定了《中国应对气候变化国家方案》，方案明确了我国 2010 年应对气候变化的目标、原则、节能减排的重点领域以及政策措施等等，对温室气体排放控制目标进行了量化，并纳入国民经济发展考核指标中。

2007 年 7 月，美国参议院提出了《低碳经济法案》，指出了低碳经济可以作为美国未来经济发展的重要战略选择。

2007 年 12 月，在泰国巴厘岛举行的联合国气候大会通过并制定了应对气候变化的“巴厘岛路线图”，该“路线图”要求到 2020 年前发达国家将温室气体减排 25%-40%，说明全球进一步迈入低碳经济。

2008 年，在日本北海道举行的 G8 峰会上，与会各方达成一致并表示未来要

寻求与《联合国气候变化框架公约》的其他签约方共同达成“到 2050 年全球温室气体排放减少 50%”的长期目标。

2009 年,在联合国气候大会上,我国政府承诺了到 2020 年所争取达到的一系列目标,并将此纳入国民经济发展规划中,并指出了未来要大力发展低碳经济和循环经济。

#### 2.1.4 低碳经济与可持续发展理论

与传统的主流经济学不同,可持续发展理论将可持续发展的概念引入到经济学的范式之内,引导着社会发展目标和发展模式发生转变。可持续发展理论的前提是增长有极限以及资源可耗竭理论。可持续发展理论注重生态系统的承载能力,考虑了人类活动面临的危机以及增长的极限问题,要求实现经济、社会和生态的可持续发展。可持续发展将发展与环境有机结合,将可持续性与公平、效率同列为经济学探讨的问题。

可持续发展对发展进行了扩展,其主要内涵为:(1)可持续发展的前提条件是人与自然和谐发展,经济发展与资源环境的永续性利用和生态系统的承载力相适应;(2)可持续发展包括经济可持续性、社会可持续性和生态可持续性;(3)可持续发展不仅要体现当代人之间的公平协调,也要考虑代际间的公平;(4)以人的需求可持续性为目标。

可持续发展理论与低碳经济之间的关系是互为依存、相互依赖。可持续发展为低碳经济提供了理论基础,低碳经济为可持续发展提供了理念,并以减少温室气体排放为指标,走资源节约型、环境友好型道路。通过不断推进低碳经济发展,大力开发新能源,不断创新清洁能源利用技术,应对资源危机,引导经济走可持续发展之路,从而才能带动整个社会和生态环境可持续发展。

#### 2.1.5 低碳经济与循环经济

循环经济概念产生于上个世纪 60 年代,最早由美国经济学家波尔丁提出的。循环经济为低碳经济的发展提供了一定的经济学理论和基础。与低碳经济相比,两者之间存在相似的经济基础和发展理念。循环经济以资源循环高效利用为目标,以“减量化、再利用、资源化”(3R)为原则,以能量梯次使用为特征,通过资源的循环利用来实现社会、经济与环境的可持续发展,两者之间存在许多异同之处:

低碳经济与循环经济的相似之处主要体现在:(1)发展模式相似:传统经济发展模式以资源环境高成本为代价,而循环经济和低碳经济都要求转变传统的发展模式,缓解传统经济社会发展模式下所带来的生态环境压力,都以建设资源节约型和环境友好型社会为共同目标;(2)是贯穿经济全过程的发展模式:在

生产环节，循环经济要实现资源减量化和生产废弃物再利用，低碳经济要低碳清洁能源利用技术的发展以及持续利用；而在消费环节，循环经济要求回收可利用的一切废弃物，低碳经济则要求实现低碳消费模式。两者都要求在经济全过程实现低排放、低能耗和低污染；（3）都注重技术与制度创新：循环经济强调循环利用技术创新，强调生产、消费等领域的体制机制创新；低碳经济以低碳技术创新为动力，强调配套体制机制创新，以便实现全新发展模式；（4）经济学基础理论相似：都包含资源经济学、环境经济学和可持续发展等基础理论，而且都以实现经济社会与自然的可持续发展为最终目标；（5）作用机理相似：针对政策，包括财税政策、资源配置效应和政策效应等两者作用机理效果相似，政策产生的相关技术进步、对区域经济的影响及其对生态的影响相似，可以互相借鉴彼此的财政、税收政策和相关法规等。

不同之处主要体现在：（1）研究侧重点不同：循环经济侧重于物质资源在经济生产和消费中的循环，低碳经济侧重于减少碳排放量为标准；（2）解决矛盾的突破口不同：循环经济以资源的高效、循环利用来改善生态环境，低碳经济以降低二氧化碳等温室气体排放量，来保护地球大气和生态系统，减缓全球温室气体效应的步伐；（3）概念的核心点不同：循环经济的核心点是物质资源的循环高效利用，旨在提高资源利用效率；低碳经济的核心点是创新低碳技术，促进产业结构升级和经济制度创新。

## 2.2 指数分解法

### 2.2.1 指数分解的基本思想和基本形式

指数分解方法的基本思想：就是把一个目标变量的变化分解成若干个影响因素变化的组合，从而可以区分出各个影响因素影响程度（贡献率）的大小，以便客观地选出影响较大的因素。在数据可获得的情况下，可以利用这种方法逐级分解下去，最终确定各个影响因素的贡献率，把各个因素区分开来。

用数学语言表达上述的基本思想：

假定目标变量为  $V$ ， $V$  可以分解成为  $n$  个影响因素  $(x_1, \dots, x_n)$  的组合形式：

$$V = \sum_i V_i, V_i = x_{1,i} x_{2,i} \cdots x_{n,i}; \quad (2.1)$$

不妨假设时间从 0 到  $T$ ，目标变量从  $V^0$  变化到  $V^T$ ，可以得出指数分解形式的基本表达式如下：

（1）加法形式（Additive Decomposition）：

$$\Delta V_{tot} = V^T - V^0 = \Delta V_{x_1} + \Delta V_{x_2} + \cdots + \Delta V_{x_n} + \Delta V_{rsd} \quad (2.2)$$

(2) 乘法形式 (Multiplicative Decomposition):

$$D_{tot} = V^T / V^0 = D_{x_1} D_{x_2} \cdots D_{x_n} D_{rsd} \quad (2.3)$$

其中:  $\Delta V_{x_i}$  和  $D_{x_i}$  分别为第  $i$  个影响因素的分解量,  $\Delta V_{rsd}$  和  $D_{rsd}$  分别为因素分解后剩余的残差项。

指数分解法对数据的处理主要采取两种方式: 时间序列分解和区间分解。时间序列分解分析是指分  $t$  和  $t+1$  年进行; 区间分解分析是指忽略中间年份变化, 只对两个基准年之间的变化进行分析, 而目前对能源消费的研究大都采用区间分解。通过分析可知, 时间序列分解分析优于区间分解分析。时间序列分解分析能对能源消费变化轨迹及决定因素提供更为详细的信息支持, 能更好地解释目标量潜在变化的机理, 但考虑到数据的获得性, 一般采用区间分解方式, 若时间序列数据可获取, 应采用时间序列分解分析, 本文采用时间序列进行分析。

目前, 采用的主要分解方法有 10 多种, 比如 Laspeyres、Divisia、SDA、AWD、Paasche、Fisher 和 Marshall-Edgeworth 等。其中 Laspeyres 分解方法和 Divisia 分解方法是最为常用的两种方法, 国内外学者已经对此做了大量的研究。

本文第五章针对这两种分解方法进行详细介绍, 这里不再赘述。

### 2.2.2 指数分解法的应用

指数分解法最早起源于 1871 年, 当时主要被用来解决经济问题, 比如产量和价格的变动对企业销售的影响, 在能源领域没有得到广泛的应用。上世纪 70 年代石油危机之后, 随着世界对能源危机以及气候变化的普遍关注, 指数分解法不断得到发展和完善, 目前已被广泛应用到许多领域。

通过对以往学者研究成果进行分析, 可以把指数分解法的主要应用领域概括如下: (1) 能源供需; (2) 与能源相关的气体 (温室气体) 排放; (3) 能源的物质流动和转换; (4) 能源效率; (5) 国内地区之间以及跨国之间相关对比。

20 世纪 80 年代以来, 碳排放和能源消费因素的分解研究已成为国际能源问题研究的热点之一, 指数分解法也在该领域的研究中得到了更广泛的应用。在指数分解法中最常用的两种是 Laspeyres 和 Divisia 分解法, 两者在二氧化碳排放量分解因素研究中应用最为广泛, 其中 Laspeyres 完全分解法和 LMDI 分解法能有效地解决分解过程中出现的“0”值和残差情况, 所以应用的最为广泛, 本文主要采用 LMDI 分解法进行研究。

## 2.3 灰色系统模型

### 2.3.1 灰色系统的概念

一个系统是由很多因素组成，所谓灰色系统只是相对而言，是介于黑色系统和白色系统之间，所指的系统信息部分已知，部分未知，即信息不完全的系统。

灰色系统理论最早由邓聚龙教授<sup>[131]</sup>提出，经过 30 年的发展已经形成以 GM 模型为核心的模型体系。灰色系统理论认为尽管事物的表象极为复杂，表征数据看似杂乱，但内部存在着必然的联系，隐藏着规律，灰色系统理论的实质就是抓住事物的表征信息，利用灰色相关、灰色聚类、灰色建模等方法，寻找事物存在的内部规律，预见事物未来的发展态势，为分析和决策提供依据。

灰色系统理论是以系统论为指导，融合了信息论、现代计算技术及现代数学理论等学科的思想和方法体系，具有较强的应用性。30 年来已经应用到各个领域，在经济管理、工程控制、环境综合治理、决策等方面得到了广泛的应用，而且已拓展到工业、农业、能源、社会、地质等许多学科和领域，也已成功解决了许多生产生活中的实际问题，并取得了显著的效果。

### 2.3.2 灰色系统的基本原理

灰色系统中常用的公理有六个，也称为原理，如下：

（1）差异信息原理：

“差异”是信息，凡是信息必有差异，资料是信息的归宿。

（2）灰性不灭原理：

信息不完全是绝对的，即灰色系统认为：“灰”是绝对的，“白”是相对的。

（3）新息优先原理：

新信息对认知的作用大于老信息。灰色系统认为新息优于老息。新息为必要信息，权重大于老息，因此应当优先考虑。唯一解有且仅有可能存在于白色系统之中。

（4）解的非唯一性原理：

信息不完全，不确定的解是非唯一的。在信息不完全、不充分、不确定的情况下，得到的解不可能唯一。

（5）最少信息原理：

灰色系统理论的特点是充分开发利用已占有的“最少信息”。灰色系统充分利用已有的最少信息，然后在灰朦胧集内演化增补，最后发展到从灰到白。

（6）根据认知原理：

灰色系统理论认为信息是认知的根据。



### 2.3.3 灰色系统模型

灰色系统模型简称 GM 模型,建模的实质就是利用原始数据序列建立微分方程的动态模型。其中 GM (1,1) 是常见的预测模型,它是 GM 模型的核心,最简单微分方程的白化形式是:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (2.4)$$

可得方程解为:

$$x^{(1)}(t+1) = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (2.5)$$

按照最小二乘法可求得:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T y = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}$$

其中:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} X^{(0)}(2) \\ X^{(0)}(3) \\ \vdots \\ X^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

于是可得到响应函数

$$X^{(1)}(t+1) = \left( X^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right) e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (2.7)$$

$X^{(1)}(t+1)$  为所得的累加的预测值,可将其还原为:

$$\hat{X}^{(0)}(t+1) = \hat{X}^{(1)}(t+1) - \hat{X}^{(1)}(t), (t=1, 2, 3 \cdots n)$$

一般, GM (1,1) 模型有几种形式:

(1) 灰微分方程形式:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (2.8)$$

(2) 灰差分形式:

$$x^{(0)}(t) + az^{(1)}(t) = u, \quad (k=1, 2, \cdots, n) \quad (2.9)$$

(3) 指数响应形式:

$$\begin{cases} \hat{x}^{(1)}(t+1) = \left[ x^{(1)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a} \\ \hat{x}^{(0)}(t+1) = -a \left[ x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} \end{cases} \quad (2.10)$$

(4) 灰指数形式:

$$x^{(0)}(t) = \left( \frac{1-0.5a}{1+0.5a} \right)^{t-2} \left[ \frac{u - ax^{(0)}(1)}{1+0.5a} \right] \quad (2.11)$$

另外, 还有  $a$  参数级比形式、 $b$  参数级比形式、含 AGO 差分形式和时间分布形式等。

然后可考虑对其进行检验, 常见的检验有残差检验, 后验差检验, 关联度检验等<sup>[132]</sup>。

(1) 残差检验:

计算原始序列和灰色预测序列之间的:

绝对误差:  $\varepsilon^{(0)}(i) = x^{(0)}(i) - \hat{x}^{(0)}(i); (i=1, 2, \dots, n);$

相对误差:  $\omega^{(0)}(i) = \left| \frac{x^{(0)}(i) - \hat{x}^{(0)}(i)}{x^{(0)}(i)} \right|; (k=1, 2, \dots, n);$

其中  $\hat{x}^{(0)}(i) = \hat{x}^{(1)}(i) - \hat{x}^{(1)}(i-1) (i=1, 2, \dots, n)。$

相对误差越小, 模型精度越高。

(2) 后验差检验:

首先计算原始序列  $x^{(0)}(i)$  的均方差:

$$S_0 = \sqrt{\frac{S_0^2}{n-1}}, \text{ 而 } S_0^2 = \sum_{i=1}^n [x^{(0)}(i) - \bar{x}^{(0)}]^2, \quad \bar{x}^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x^{(0)}(i)。$$

然后计算残差序列  $\varepsilon^{(0)}(i)$  的均方差:

$$S_1 = \sqrt{\frac{S_1^2}{n-1}}, \text{ 而 } S_1^2 = \sum_{i=1}^n [\varepsilon^{(0)}(i) - \bar{\varepsilon}^{(0)}]^2, \quad \bar{\varepsilon}^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon^{(0)}(i)。$$

再计算方差比  $c = \frac{S_1}{S_0},$

最后计算小误差概率  $p = \left\{ \left| \varepsilon^{(0)} - \bar{\varepsilon}^{(0)} \right| < 0.6745 \cdot S_0 \right\}。$

根据下面表 2.1 确定模型的预测精度等级划分。

表 2.1 预测精度等级划分表

Sheet 2.1 Hierarchies table of forecasting precision

小误差概率 $p$ 值	方差比 $c$ 值	预测精度等级
$> 0.95$	$< 0.35$	好
$> 0.80$	$< 0.5$	合格
$> 0.70$	$< 0.65$	勉强合格
$\leq 0.70$	$\geq 0.65$	不合格

其他类型的 GM 模型在本文不做详细介绍。

## 2.4 马尔科夫链

马尔科夫链 (Markov) 模型是独立随机试验模型最直接的推广, 1906 年, 俄罗斯数学家 Markov 对此进行研究, 以此而得名, 之后数学家 Kolmogorov、Feller 和 Doob 等数学家研究并发展了该理论。简言之, 一个随机过程如果给定当前的状态, 未来状态的值不受过去状态值的影响就称具有 Markov 性。

在随机过程理论中, 马尔科夫过程占有重要的地位, 是一类具有普遍意义的随机过程。马尔科夫过程  $\{X(t), t \in T\}$  可能取得的值被称为状态, 这些状态的全体组成了马尔科夫过程的状态空间。时间参数  $t$  可分为离散和连续两种, 状态空间  $S$  也可分为离散和连续两种类型。通常情况下, 时间参数和状态都是离散的马尔科夫过程被称为马尔科夫链, 而时间参数连续的马尔科夫过程被称为马尔科夫过程。

### 2.4.1 马尔科夫链定义

假设存在一个随机变量序列  $\{X_m, m \in N^+\}$ , 它只在时间参数集  $N^+ = \{1, 2, \dots, n\}$  中取值, 对任意的整数  $m \geq 0$  和任意的状态空间值  $i_0, i_1, \dots, i_{m-1}, \dots, i, j \in S$ , 在  $X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_{m-1} = i_{m-1}, X_m = i$  的条件下,  $X_{m+1} = j$  的概率只和  $X_m = i$  有关, 与之前的状态都无关<sup>[133]</sup>, 即:

$$\begin{aligned} & P(X_{m+1} = j | X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_{m-1} = i_{m-1}, X_m = i) \\ &= P(X_{m+1} = j | X_m = i) \end{aligned}$$

则称  $\{X_m : m \in N^+\}$  为一有限域上的马尔科夫链 (Markov Chain)。

公式的直观意义为: 假设现在系统处在时刻  $m$  的状态  $X_m$ ,  $m+1$  时刻系统所处的状态  $X_{m+1}$  与过去时刻  $0, 1, \dots, m-1$  的状态  $X_0, X_1, \dots, X_{m-1}$  无关, 仅与现在所处

的状态有关。

这种特性称为**马尔科夫性**或**无后性**。

如果一个马尔科夫链  $\{X_m : m \in N^+\}$  满足：对任意的  $i, j \in S$ ，以及  $m \in N^+$ ，恒有：

$$P(X_{m+1} = j | X_m = i) = P(X_1 = j | X_0 = i)$$

则称这个马尔科夫链是**齐次的**或**平稳的**。

#### 2.4.2 转移概率矩阵

$\forall i, j \in S$ ，称  $P_{ij}(m) = P(X_{m+1} = j | X_m = i)$  为  $m$  时刻的一步转移概率。若对  $\forall i, j \in S$ ， $P_{ij}(m) = P_{ij}$ ，即  $P_{ij}$  与  $m$  无关，则称  $\{X_m : m \in N^+\}$  为齐次马尔科夫链。

记  $P = (P_{ij})$ ，称  $P$  为  $\{X_m : m \in N^+\}$  的**一步转移概率矩阵**。

设  $\{X_m : m \in N^+\}$  为马尔科夫链，其中  $P = (P_{ij})$  是一步转移概率矩阵，显然可知：

$$P_{ij} \geq 0, \quad i, j \in S, \quad \sum_{j \in S} P_{ij} = 1, \quad i \in S$$

$\forall i, j \in S$ ，称  $P_{ij}^{(m)} = P(X_{n+m} = j | X_n = i)$  为从状态  $i$  出发，经过  $m$  时刻后到达状态  $j$  的  $m$  步转移概率， $P^{(m)} = (P_{ij}^{(m)})$  为  $m$  步转移概率矩阵。

特别地，当  $m=0$  时， $0$  步转移概率矩阵为单位方阵  $I$ ，即：

$$P_{ij}^{(0)} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

利用马尔科夫链的定义可得：

$$\begin{aligned} & P\{X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_m = i_m, X_{m+1} = i_{m+1}\} \\ &= P\{X_{m+1} = i_{m+1} | X_m = i_m\} P\{X_m = i_m | X_{m-1} = i_{m-1}\} \cdots P\{X_1 = i_1 | X_0 = i_0\} P\{X_0 = i_0\} \\ &= P\{X_0 = i_0\} \prod_{k=1}^{m+1} P\{X_k = i_k | X_{k-1} = i_{k-1}\} \end{aligned}$$

如果马尔科夫链  $\{X_m : m \in N^+\}$  是齐次的，可得出：

$$\begin{aligned}
& P\{X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_m = i_m, X_{m+1} = i_{m+1}\} \\
&= P\{X_{m+1} = i_{m+1} | X_m = i_m\} P\{X_m = i_m | X_{m-1} = i_{m-1}\} \cdots P\{X_1 = i_1 | X_0 = i_0\} P\{X_0 = i_0\} \\
&= P\{X_0 = i_0\} \prod_{k=1}^{m+1} P_{i_{k-1}i_k}
\end{aligned}$$

以上分析可知：齐次马尔科夫链的有限维联合分布可由初始分布概率和一步转移概率矩阵得出。

### 2.4.3 马尔科夫链的应用

下面简单介绍一下马尔科夫链的应用情况：

(1) 马尔科夫链最经典的应用是在概率方面，主要用在排队论、存储模型以及统计学中建模等方面，比如算法编码等。近几年，又广泛被用在网络流量分析和计算机系统建模等方面<sup>[134]</sup>。

(2) 马尔科夫链研究和应用领域发展较快的是时间序列分析，它可以处理 AR 模型和一些非线性模型。在处理非线性模型时，可将传统的一维状态空间描述转化为向量空间的描述。Meyn 和 Tweedie 对此做了相应的研究。

(3) 马尔科夫链理论还应用在计算机仿真算法理论，如 Metropolis-Hastings 算法以及其他算法，Robert 和 Casella 对此进行了研究。

(4) 马尔科夫链还有其他一些领域的应用。应用在地理统计学中，用于随机模拟基于观察数据的二到三位变量，目前正在研究发展中；应用在人力资源中，分析人在某段时间内调动的概率，通过人事变动的规律，推测未来的人员供给情况；应用在预测领域，用于对结构等因素进行预测。

## 2.5 本章小结

本章是全文研究的理论基础章节，主要对论文研究中用到的理论和方法进行阐述，其中涉及到的概念和理论基础主要有：低碳经济、循环经济、可持续发展理论、指数分解法、灰色系统模型、马尔科夫链等。

其中重点为指数分解法、灰色系统模型以及马尔科夫链，首先对这些理论的概念进行介绍，然后对基本原理进行分析，最后概括了各个模型的应用。



### 3 我国二氧化碳排放清单分析

本章首先从我国二氧化碳排放的现状入手，分析了二氧化碳排放的主要来源，然后对排放源进行分析，并结合IPCC提供的分析方法估算二氧化碳的排放量，并据此分析我国二氧化碳整体排放情况，最后对本章内容进行小结。

#### 3.1 我国二氧化碳排放现状及排放源分析

改革开放以来，随着我国经济的不断发展和能源需求量的不断增加，二氧化碳排放总量呈现逐渐上升的趋势。根据国际能源署（2009）发布的统计数据显示，2007 年我国的二氧化碳排放量超过美国，成为全球第一大二氧化碳排放国。我国二氧化碳排放量的快速增长可能不仅仅是化石能源消费的结果，还存在其他方面的影响因素，因此，有必要对二氧化碳排放源进行深入分析。

2004 年，我国政府向联合国提交的《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》<sup>[135]</sup>，其中第二章为国家温室气体排放清单，指出了温室气体清单编制及报告的范围主要包括能源活动、工业生产过程、农业活动、土地利用变化和林业、城市废弃物处理的温室气体排放量估算。其中二氧化碳作为主要的温室气体，1994 年排放量达 26.66 亿吨，占当年温室气体排放总量的 73.05%，详细数据见表 3-1。

表 3-1 1994 年温室气体排放量及折算二氧化碳当量  
Table 3-1 1994 greenhouse gas emissions in CO<sub>2</sub> equivalent

温室气体	排放量（万吨）	二氧化碳当量（万吨）	比重（%）
二氧化碳	266599	266599	73.05
甲烷	3429	72003	19.73
氧化亚氮	85	26350	7.22
合计		364952	100.00

通过对 1994 年国家温室气体排放的统计数据分析得知，对二氧化碳排放贡献较大的排放源主要是能源活动、工业生产过程和土地利用变化和林业。其中能源活动和工业生产活动是二氧化碳排放过程，而土地利用变化和林业活动则主要是二氧化碳吸收的过程。

能源活动产生的二氧化碳主要是指能源生产及加工转换部门、工业部门、交通部门、商业部门、民用和其他部门在燃料燃烧过程中排放的二氧化碳，燃料燃烧所产生的二氧化碳是主要的排放源。

工业生产过程产生的二氧化碳主要是指在生产水泥、石灰、钢铁和电石等工

业产品的生产过程中所产生的排放量。

土地利用变化和林业二氧化碳的排放清单主要考虑的是森林和其他木本生物量储量变化所引起的二氧化碳吸收过程,以及森林和草地的转化所带来的二氧化碳排放的过程,其表现出的总效果为二氧化碳的吸收。本文主要研究二氧化碳排放及其主要的影响因素,所以对二氧化碳吸收和转化过程不再进行深入分析。

### 3.2 我国能源活动的二氧化碳排放清单分析

能源活动是我国二氧化碳排放的重要来源。能源活动的二氧化碳排放主要源于化石燃料的燃烧。本节以 1990~2010 年的能源统计年鉴中的数据为基础,主要考虑燃料燃烧所带来的二氧化碳排放。而燃料在燃烧过程中,存在不完全燃烧的情况,除了大部分以二氧化碳的形式排出,还有一部分以一氧化碳甲烷或挥发性有机化合物的形式排出,因此研究此类二氧化碳时,除了考虑各类燃料的排放因子,还需考虑它们的氧化系数。

参照 IPCC (2006) 提供的二氧化碳排放估算方法,考虑所需数据的可获得性,本文采用历年中国能源统计年鉴(国家统计局能源统计司, 1991-1996, 1997-1999, 2000-2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011) [136] 中我国能源平衡表的统计数据,对 1991-2010 年我国能源活动中化石燃料燃烧产生的二氧化碳进行估算。

首先,参考最新的能源统计年鉴中各部门化石燃料消费的统计数据分类,对化石燃料品种进行分类,共分为三大类,即煤炭类燃料、石油类燃料和天然气类燃料。煤炭类燃料包括原煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、煤矸石、焦炭、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、其他煤气、其他焦化产品等;石油类燃料包括原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、石脑油、润滑油、石蜡、溶剂油、石油沥青、石油焦、液化石油气、炼厂干气以及其他石油制品;而天然气类燃料主要包括天然气和液化天然气。但考虑到中国能源统计年鉴 2010 之前年份的统计年鉴数据的可获得性,可以将三大分类中的若干子项进行合并,最终得出本文化石燃料数据的三大分类:煤炭类燃料(原煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、焦炭、焦炉煤气、其他煤气、其他焦化产品)、石油类燃料(原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、炼厂干气、其他石油产品)和天然气类燃料(天然气)。

然后对各类化石能源进行单位换算,以便统一各类化石燃料消费数据的量值。煤炭和石油类燃料以吨标准煤为计量单位,而天然气类燃料以立方米计量,所以在求解二氧化碳排放量之前需要统一单位,将其转化为普通能源单位计量。可参考中国能源统计年鉴中各种能源折标准煤参考系数表中的数据以及 IPCC (2006) 1.4.2 章节关于各类燃料的排放因子数据,给出中国主要化石燃料的热值及排放因子表,详见表 3-2。



表 3-2 中国主要化石燃料的热值及排放因子表  
Table 3-2 China's major fossil fuel calorific value and emission factor

类 别	燃料名称	平均低位发热量	排放因子( $10^4\text{t/TJ}$ )
煤炭类燃料	原 煤	209.08 TJ/ $10^4\text{t}$	0.00946
	洗精煤	263.44 TJ/ $10^4\text{t}$	0.00946
	其他洗煤	153.93 TJ/ $10^4\text{t}$	0.00946
	型 煤	177.96 TJ/ $10^4\text{t}$	0.00946
	焦 炭	284.35 TJ/ $10^4\text{t}$	0.0107
	焦炉煤气	1672.6 TJ/ $10^8\text{m}^3$	0.00444
	其它煤气	842.9 TJ/ $10^8\text{m}^3$	0.00444
	其它焦化产品	284.35 TJ/ $10^4\text{t}$	0.0094536
石油类燃料	原 油	418.16 TJ/ $10^4\text{t}$	0.00733
	汽 油	430.7 TJ/ $10^4\text{t}$	0.00693
	煤 油	430.7 TJ/ $10^4\text{t}$	0.00715
	柴 油	426.52 TJ/ $10^4\text{t}$	0.00741
	燃料油	418.16 TJ/ $10^4\text{t}$	0.0077314
	液化石油气	501.79 TJ/ $10^4\text{t}$	0.00631
	炼厂干气	460.55 TJ/ $10^4\text{t}$	0.0073284
	其它石油制品	418.16 TJ/ $10^4\text{t}$	0.00733
天然气类燃料	天然气	3893.1 TJ/ $10^8\text{m}^3$	0.00561

中国能源平衡表中给出的终端能源消费数据是以分部门形式列出各类化石燃料的消费量，其中主要分为七大类别，分别为农、林、牧、渔、水利业；工业；建筑业；交通运输、仓储及邮电通讯业；批发和零售贸易业、餐饮业；生活消费以及其它部门。其中工业部门中化石燃料的消费量应该去掉作为原料、材料以及非能源产品用途的部分，还需把能源加工转换过程中的投入量计入进来。

化石燃料在燃烧过程中，有效燃烧能确保燃料中的碳最大程度的被氧化，其中存在一小部分碳在燃烧过程中可能未被氧化，因此求解二氧化碳排放量的过程中还需要考虑每个部门各种燃料燃烧的碳氧化系数。可借鉴 IPCC（2006）推荐的部门化石燃料氧化系数，结合国内外相关研究成果对氧化系数进行细化，最终得出各个部门不同燃料的氧化系数表（详见表 3-3）。表中的部门分类可以参考《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》温室气体排放清单中的部门分类，其中把农、林、牧、渔、水利业和建筑业合并为一类简称农业和建筑业，交通运输、仓储及邮电通讯业归为交通部门，批发和零售贸易业归为商业部门。

表 3-3 我国能源终端消费部门化石燃料氧化系数表

Table 3-3 China's energy end-consumer sector fossil fuel oxidation coefficient

燃料类型	工业	农业	建筑业	交通	商业	生活消费	其他
原 煤	0.899	0.899	0.899	0.80	0.80	0.80	0.80
洗精煤	0.899	0.899	0.899	0.80	0.80	0.80	0.80
其他洗煤	0.899	0.899	0.899	0.80	0.80	0.80	0.80
型 煤	0.899	0.899	0.899	0.80	0.80	0.80	0.80
焦 炭	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
焦炉煤气	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
其它煤气	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
其它焦化产品	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
原 油	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
汽 油	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
煤 油	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
柴 油	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
燃料油	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
液化石油气	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
炼厂干气	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
其它石油制品	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
天然气	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

此部分主要参考 David Fridley、Glen Peters、Christopher Weber 等的研究成果

引用文献网址：<http://eaei.lbl.gov/sites/all/files/lbl-4600e-2008-c02-inventorymarch-2011.pdf>

<http://ntnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:121799/FULLTEXT01.pdf>

依照上述表中的数据以及历年能源统计年鉴中我国能源平衡表数据，可以计算出上述各个部门在某一年度化石燃料燃烧所排放的二氧化碳量。具体的计算公式如下所示：

$$E_{CO_2} = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{17} A_{ij} \times K_{ij} \quad (3.1)$$

$$K_{ij} = Q_j \times C_j \times L_{ij} \quad (3.2)$$

其中：

$E_{CO_2}$  表示该年度化石燃料燃烧排放的二氧化碳总量；

$A_{ij}$  表示该年度第 i 部门第 j 种燃料的表现消费量；

$K_{ij}$  表示第 i 部门第 j 种燃料的二氧化碳排放系数；

$Q_j$  表示第 j 种燃料的平均低位发热量；

$C_j$  表示第 j 种燃料的排放因子；

$L_{ij}$  表示第  $i$  部门第  $j$  种燃料的碳氧化系数。

下面可以取 1991-2010 年的能源统计年鉴中消费量数据,通过上述方法分析和计算,求得每年能源活动中化石燃料燃烧所产生的二氧化碳。由于受篇幅所限,中国能源统计年鉴中表观消费量数据和计算过程不再赘述,这里只给出最后的求解结果。经计算,可得我国化石燃料二氧化碳的排放系数,详见表 3-4。

表 3-4 我国化石燃料二氧化碳排放系数表  
Table 3-4 China's fossil fuel carbon dioxide emissions coefficient

燃料类型	工业	农业和建筑业	交通	商业	生活消费	其他
原 煤	1.778129	1.778129	1.582317	1.582317	1.582317	1.582317
洗精煤	2.240436	2.240436	1.993714	1.993714	1.993714	1.993714
其他洗煤	1.309104	1.309104	1.164942	1.164942	1.164942	1.164942
型 煤	1.513468	1.513468	1.346801	1.346801	1.346801	1.346801
焦 炭	2.951269	2.951269	2.951269	2.951269	2.951269	2.951269
焦炉煤气	7.352081	7.352081	7.352081	7.352081	7.352081	7.352081
其它煤气	3.705051	3.705051	3.705051	3.705051	3.705051	3.705051
其它焦化产品	2.607487	2.607487	2.607487	2.607487	2.607487	2.607487
原 油	3.003811	3.003811	3.003811	3.003811	3.003811	3.003811
汽 油	2.925056	2.925056	2.925056	2.925056	2.925056	2.925056
煤 油	3.017915	3.017915	3.017915	3.017915	3.017915	3.017915
柴 油	3.097303	3.097303	3.097303	3.097303	3.097303	3.097303
燃料油	3.168303	3.168303	3.168303	3.168303	3.168303	3.168303
液化石油气	3.134632	3.134632	3.134632	3.134632	3.134632	3.134632
炼厂干气	3.341344	3.341344	3.341344	3.341344	3.341344	3.341344
其它石油制品	3.003811	3.003811	3.003811	3.003811	3.003811	3.003811
天然气	21.62189	21.62189	21.62189	21.62189	21.62189	21.62189

我国历年与能源活动相关的二氧化碳排放的估算量见表 3-5, 由于考虑到数据的可获得性, 加上获取的数据本身存在误差, 所以该方法估算的结果可能与实际数据存在一定的偏差。通过对这些数据进行分析, 可以用图描绘 1991-2010 年能源活动相关的二氧化碳排放的增长态势, 详见图 3-1。1991 年我国与能源活动相关的二氧化碳排放量达到 215458.51 万吨, 之后不断增长, 到 1996 年二氧化碳排放量达到 283479.19 万吨, 并维持这一状态直到 1998 年, 随后又缓慢增长到 2002 年的 329602.59 万吨。从 2003 年开始, 随着我国经济的飞速发展以及对能源的快速需求, 与能源活动相关的二氧化碳排放量出现迅速上升的态势。其中工业部门的快速发展使得其所带来的二氧化碳排放在与能源相关活动的二氧化碳排放量中占据较大的比重, 这主要是由该部门的一系列工业活动对化石燃料需求的快速增长所引起的。

表 3-5 我国 1991-2010 年与能源活动相关的二氧化碳排放清单 单位：万吨

Table 3-5 CO<sub>2</sub> emissions by sources from the energy sector in China from 1991 to 2010 (10<sup>4</sup> tons)

年份	工业	农业和建筑业	交通	商业	生活消费	其他	合计
1991	162875.72	9232.98	8771.36	1864.20	27458.69	5255.57	215458.51
1992	173786.79	8838.03	9161.46	1992.89	25365.07	6629.28	225773.51
1993	192132.04	8259.33	9627.58	2778.20	24921.64	8245.08	245963.85
1994	204050.05	8512.77	9541.94	2375.90	23253.83	8073.82	255808.32
1995	219395.23	8920.80	10390.09	2626.57	24209.33	7363.19	272905.21
1996	228304.08	7372.45	18179.73	3169.89	19907.18	6545.86	283479.19
1997	227380.80	7545.73	18333.80	3182.51	19397.59	6534.38	282374.80
1998	228305.53	7723.16	18628.17	3226.36	19369.67	6390.10	283642.98
1999	240227.12	7604.26	19496.30	3092.17	18911.53	6597.11	295928.50
2000	247747.00	7850.48	20596.55	3032.86	18700.97	6809.01	304736.86
2001	252745.09	8173.67	21174.09	3012.36	18892.58	6934.60	310932.39
2002	268458.40	8869.54	22664.67	3105.48	19355.77	7148.73	329602.59
2003	317240.55	9989.49	25624.71	3297.53	21128.73	7607.51	384888.51
2004	365900.86	11821.87	30548.40	3778.79	24085.53	8934.41	445069.85
2005	409302.67	13032.65	34322.02	4254.92	24970.29	8858.26	494740.81
2006	451717.43	13799.53	37821.36	4549.04	26455.42	9393.81	543736.59
2007	486077.94	13865.43	41094.86	4885.18	28200.44	10247.36	584371.20
2008	504745.70	12450.96	42488.97	4379.71	27589.87	10362.95	602018.15
2009	531908.67	13976.85	43747.47	5001.84	28342.77	10545.20	633522.81
2010	576444.40	11390.81	47711.51	5164.22	30365.72	11406.19	682482.86

注：以上清单数据是根据本文的计算方法得出

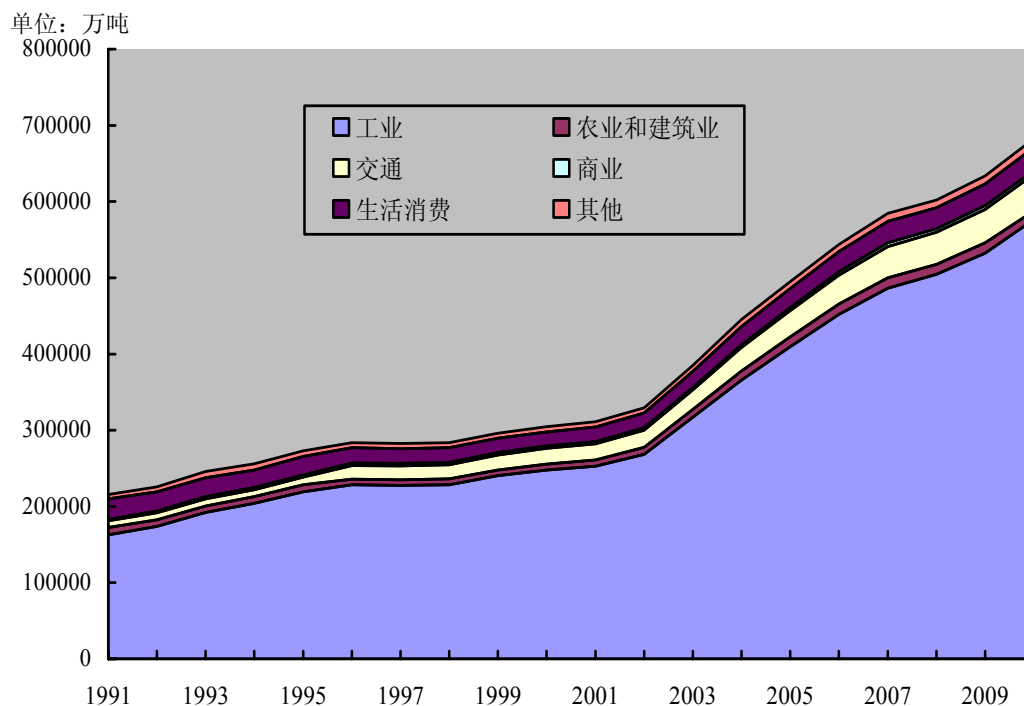


图 3-1 我国 1991-2010 年能源活动相关行业的二氧化碳排放情况

Figure 3-1 CO<sub>2</sub> emissions by sources from the energy sector in China from 1991 to 2010

### 3.3 我国工业生产活动的二氧化碳排放清单分析

除了能源活动中化石燃料燃烧带来的二氧化碳外，工业活动也会排放出大量的二氧化碳，主要是指化石燃料的非能源使用，包括作为原料、还原剂以及其他的非能源产品使用。是主要利用的是燃料的物理特性，而非燃料用途。

本文主要考虑采掘工业、化学工业以及金属工业中主要工业品生产过程中的二氧化碳排放。采掘工业中主要考虑水泥、石灰、玻璃等工业品生产过程中排放的二氧化碳；化学工业主要考虑氨气、电石、纯碱等工业品生产过程中排放的二氧化碳；金属工业中主要考虑生铁、钢材、铁合金、焦炭等工业品生产过程中排放的二氧化碳，焦炭在此主要作为冶炼过程中的还原剂。但考虑到数据的可获得性以及数据的重复计算，本节选取水泥、生铁、钢材、电石、纯碱、合成氨、玻璃等作为研究对象，对工业生产活动的二氧化碳排放进行分析，主要工业过程的排放因子详见表 3-6。

表 3-6 主要工业过程的二氧化碳排放因子

Table 3-6 Carbon dioxide emission factor of major industrial process

主要工业产品	排放因子（吨 CO <sub>2</sub> /吨）
水泥（熟料）	0.52
玻璃	0.2
石灰	0.75
生铁	1.35
钢	1.06
合成氨	2.104
碳化钙（电石）	1.1
纯碱	0.138

注：此处给出的生铁和钢的二氧化碳排放因子包含燃料的排放部分，因此在具体计算时需要  
对非燃料部分的排放量进行估算

可参考国家统计局工业交通统计司编制的《中国工业经济统计年鉴》中历年主要工业产品的统计数据，并结合 IPCC（2006）第三卷工业过程及使用中提供的主要工业品二氧化碳排放因子的计算方法以及主要工业品的排放因子，可得出工业生产活动中二氧化碳的排放量。由《中国工业经济统计年鉴 2011》中的统计数据可知上述各种工业产品 1991-2010 年的产量详见表 3-7。

表 3-7 1991 年-2010 年主要工业产品的产量表 单位：万吨

Table 3-7 The output of major industrial products from 1991 to 2010 ( $10^4$  tons)

年份	水泥	平板玻璃	电石	生铁	粗钢	纯碱	合成氨
1991	25261	435.6	235.8	6765	7100	393.6	2201.6
1992	30822	467.95	242.5	7589	8094	455	2298.1
1993	36788	554	264.2	8739	8956	534.9	2192.5
1994	42118	596.25	292	9741	9261	581.4	2436.8
1995	47561	786.6	345.7	10529	9536	597.7	2765.9
1996	49119	803.45	309.2	10722	10124	669.3	3094.2
1997	51174	831.55	344.7	11511	10894	725.8	3000.3
1998	53600	859.7	281.3	11864	11559	744	3134.2
1999	57300	871	273.1	12539	12426	766	3431.7
2000	59700	917.6	340.4	13101	12850	834	3363.7
2001	66104	1048.2	346.3	15554	15163	914.4	3427.3
2002	72500	1172.3	425.6	17085	18237	1033.2	3675.3
2003	86208	1385.15	530	21367	22234	1133.6	3822.7
2004	96682	1851.3	796.2	26831	28291	1334.7	4135.1
2005	106885	2010.5	894.6	34375	35324	1421.1	4596.3
2006	123676	2328.75	1177.4	41245	41915	1560	4936.8
2007	136117	2695.9	1471.3	47652	48929	1765	5171.1
2008	142356	2994.5	1295.6	47824	50306	1854.6	4876.2
2009	164398	2928.7	1503.3	55283	57218	1944.8	5136.4
2010	188191	3316.55	1471.4	59733	63723	2034.8	4964.6

注：1、由于历年石灰产量数据的缺失，故在此不再计算石灰生产过程所排放的二氧化碳；

2、表中给出的是水泥的产量，但水泥熟料的产量年度数据不全，可以根据已知数据估算出水泥熟料的缺失年份的数据。

从而可以得出我国 1991-2010 年工业生产过程相关的二氧化碳排放估算值，详细情况见图 3-2，从图中可以看出工业生产过程排放二氧化碳的大致趋势。1991 年，我国工业生产过程所排放的二氧化碳总量为 14832 万吨，其中水泥生产过程所排放的二氧化碳有 8144 万吨。2010 年，中国工业生产过程排放的二氧化碳约为 87138 万吨，是 1991 年排放总量的 5.9 倍，其中水泥工业产生的二氧化碳排放量为 59396 万吨。通过估算分析可知：水泥工业生产过程中二氧化碳排放量在整个工业生产过程中占有很大的比重，从 1991 年的 54.91% 上升到 2010 年的 68.16%；然后钢铁、合成氨、电石等工业生产过程中排放的二氧化碳也占有较大的比重，但与水泥工业相比相差较大；玻璃和纯碱等生产过程也有较多的二氧化碳排放，但相对前几种工业品来说，排放的比例较小。

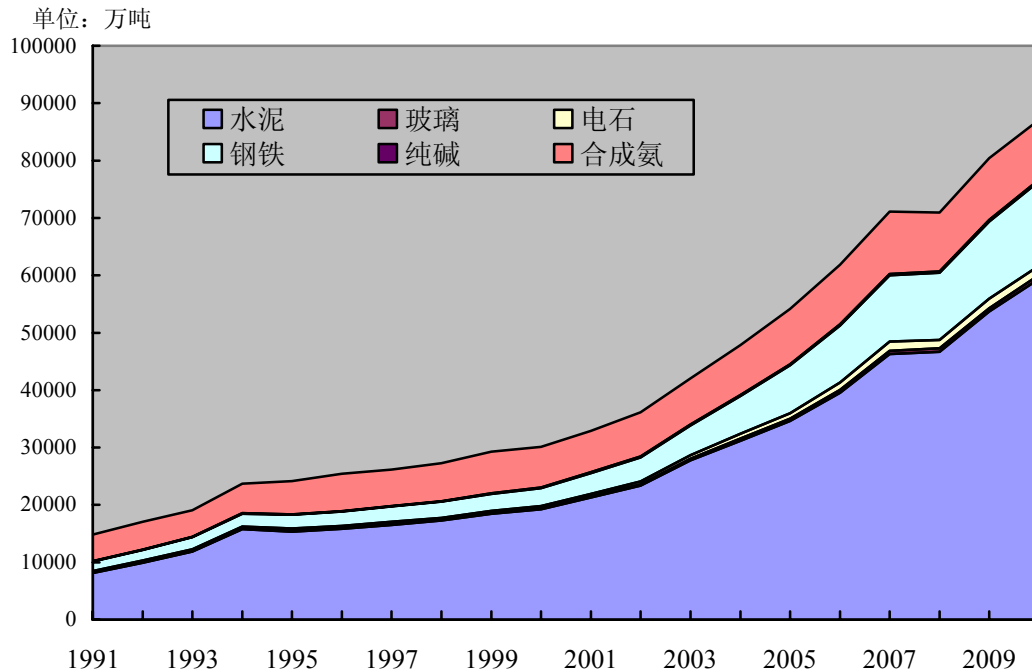


图 3-2 我国 1991-2010 年工业生产过程二氧化碳排放情况

Figure 3-2 CO<sub>2</sub> emissions by sources from industrial processes sector in China from 1991 to 2010

### 3.4 我国二氧化碳排放清单分析

结合 3.2 和 3.3 节对我国二氧化碳排放情况分析估算的结果，可以给出我国近 20 年来二氧化碳排放的总体情况，在此不考虑土地利用变化和林业活动所带来的碳汇，详见图 3-3。

从图 3-3 可以清晰地看出：从整体排放情况来看，近 20 年二氧化碳排放总量呈现不断增长的趋势。1991-1996 年二氧化碳排放总量呈现缓慢增长，从 1991 年的约 230290 万吨增长到 1995 年的 297073 万吨，5 年间增长了将近 6.7 亿吨；1996 到 2001 年间，二氧化碳排放量相对比较平稳，每年的增长量相对较小，从 1996 年的 308906 万吨增长到 2001 年的 343838 万吨，6 年间二氧化碳排放量增长了 3.5 亿吨左右；从 2002 年起，随着经济的飞速发展，二氧化碳排放总量飞速增长，9 年间二氧化碳排放总量增长了约 1 倍多。

从图 3-3 还可以看出：在二氧化碳排放构成方面，能源活动中化石燃料燃烧所带来的二氧化碳排放占据较大的比重，而工业生产过程中产生的二氧化碳相对较小。从图中二氧化碳总排放和能源活动排放两条折线之间间隙变化，可以得出能源活动中化石燃料燃烧所带来的二氧化碳排放量在二氧化碳总排放中所占的比重逐渐减少，已从 1991 年的 93.56% 下降到 2010 年的 88.68%。由于我国对化石能源特别是煤炭资源需求的依赖，短期内我国二氧化碳的排放总量还会继续呈现上升的趋势。但由于受全球范围内节能减排大环境的影响，未来几年二氧化碳排放的增速会相对放缓。

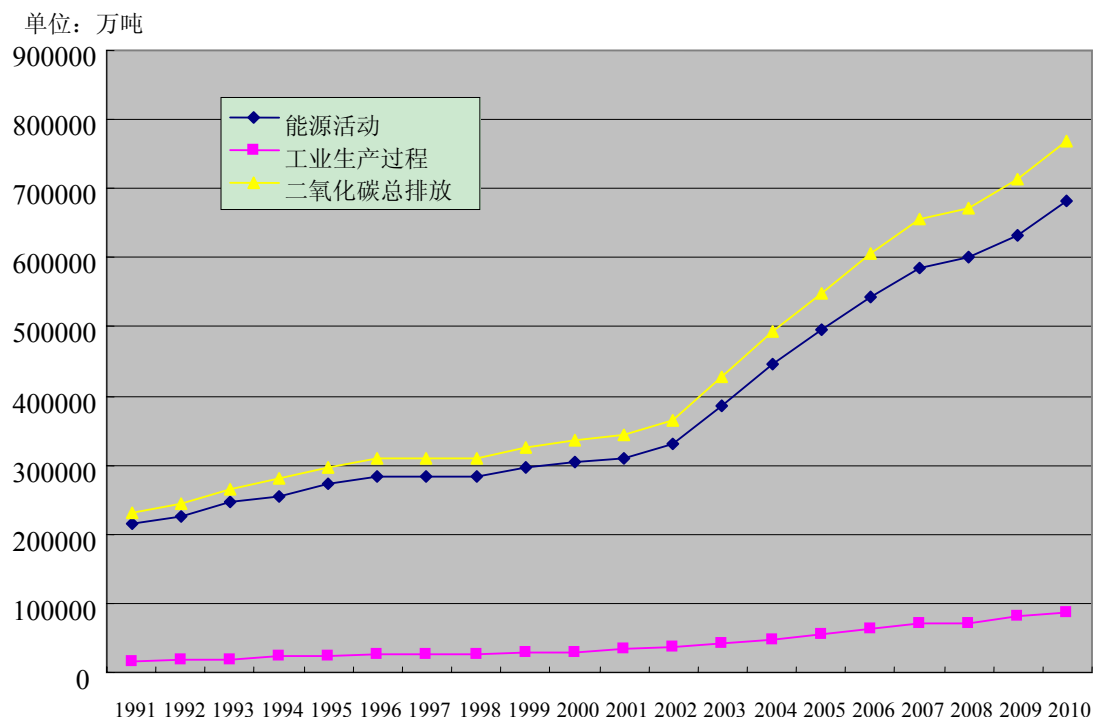


图 3-3 我国 1991-2010 年二氧化碳排放情况

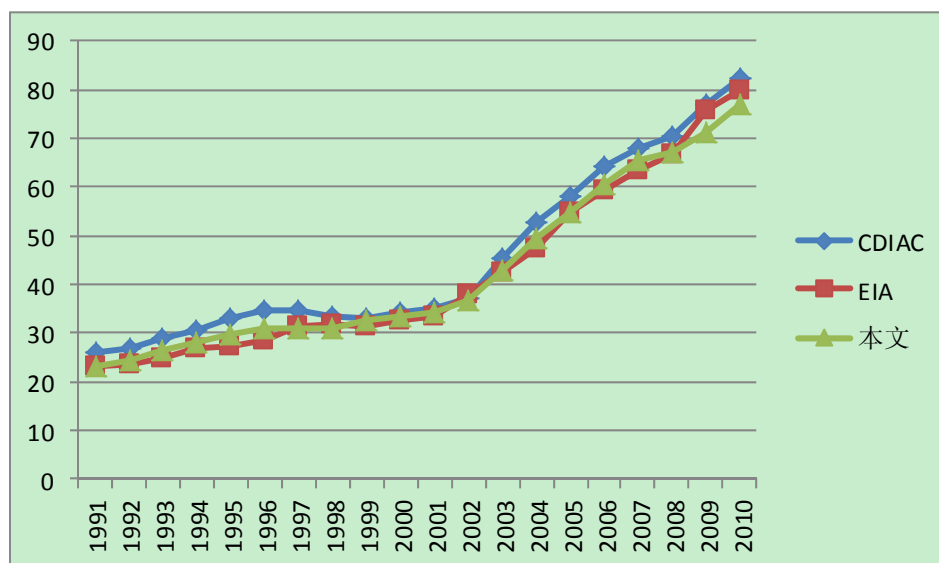
Figure 3-3 Carbon dioxide emissions in China from 1991 to 2010

本文对我国 1991-2010 年的二氧化碳排放量估算的研究主要参考了 IPCC (2006) 提供的估算方法和排放因子, 然后结合中国的实际情况, 采用《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》和《中国工业经济统计年鉴》相关的统计数据, 对二氧化碳排放量进行估算和分析。通过分析发现, 本文对我国历年来二氧化碳的估算数据与世界上其他主要能源机构如美国田纳西州橡树岭国家实验室环境科学部二氧化碳信息分析中心(CDIAC)、美国能源信息署(EIA)等估算的数据在变化趋势上相对吻合, 但具体的年度数据存在一定的差异。具体情况详见图 3-4。

从图 3-4 中我们可以清晰地看出, 本文所得出的碳排放结果明显低于其它两大机构所得出的结果, 况且本文在研究的过程中不考虑碳汇所造成的影响, 考虑二氧化碳的吸收过程, 二氧化碳排放数据还可能会更小。以 2010 年的二氧化碳排放量为例进行对比分析, 本文估算的结果为 2010 年二氧化碳排放量为 769621 万吨; 据英国石油公司(BP)发布的数据显示, 2010 年中国的二氧化碳排放量达到 83.3 亿吨; 而二氧化碳情报分析中心对部分国家的二氧化碳分析数据显示 2010 年中国二氧化碳的排放量达到 82.4 亿吨。通过 2010 年的数据对比发现, 本文估算的数据相对较小。同样的方法对比其他年份的数据, 可以得到类似的结论。通过对本文估算方法的改进和优化以及分析的结果进行对比分析可知, 我国实际排放的二氧化碳可能和国际机构估算的数值存在出入, 估计机构估算的数值相对



偏大，具体原因在这里不再深入研究，本文将以此排放清单为基础对我国二氧化碳排放的情况进行研究。



数据来源：EIA：<http://www.eia.gov/countries/country-data.cfm?fips=CH&trk=m#cde>

CDIAC：<http://data.worldbank.org.cn/indicator/EN.ATM.CO2E.KT>

图 3-4 二氧化碳排放结果对比

Figure 3-3 Comparison of carbon dioxide emissions results

### 3.5 本章小结

本章首先对我国二氧化碳排放现状进行分析，结合我国发布的信息通报对我国二氧化碳排放源进行分析，分析得出能源活动和工业生产活动是我国二氧化碳排放的主要来源。

然后分别依据能源活动和工业生产活动相关的统计数据，参照 IPCC 提供的估算原理，结合相关学者的研究成果对氧化系数进行细化，完善了二氧化碳排放计算模型，并据此估算排放量，经过计算得出了能源活动和工业生产活动中二氧化碳的排放清单。

最后对二氧化碳排放的整体排放清单情况进行分析，并和国际相关机构进行对比，最终以本文的估算方法进行研究。



## 4 我国二氧化碳排放特征和影响因素分析

本章在上一章对我国二氧化碳排放源分析的基础上,对我国二氧化碳排放的因素进行分析。首先概括归纳出二氧化碳排放的特征,分别从区域和行业两方面进行分析,然后总结出我国二氧化碳排放的主要影响因素,并阐述各个主要影响因素对我国二氧化碳排放产生的影响,最后对本章进行小结。

### 4.1 我国二氧化碳排放特征分析

通过第三章的分析可知,伴随着近年来我国经济的快速发展,对化石能源的需求也不断加大,导致了二氧化碳排放总量也随之增多,并且呈现不断上升的趋势。从 2003 年以来,二氧化碳排放总量激增,尤其是 2007 年超过美国成为世界第一大二氧化碳排放国。

由于世界温室气体排放所带来的环境问题日趋严重,作为排放比重最大的温室气体——二氧化碳的排放已受到国际社会的广泛关注,世界各国不断采取各种有效措施致力于温室气体的减排。受国际大环境的影响,我国二氧化碳的排放越来越受到国际社会的质疑,减排的压力越来越大。面对这种局面,我国政府把节能减排作为重要的指标进行考核,这对下一步实现减排目标和经济社会的可持续发展都起到了至关重要的作用。但我国是一个发展中国家,地域辽阔,行业和区域发展差异显著,特殊的国情决定了节能减排的实施要切合具体情况,因此有必要对我国二氧化碳排放的区域和行业特征进行分析。

#### 4.1.1 我国二氧化碳排放的区域特征

上个世纪 80 年代以后,由于改革开放政策的实施,我国的区域经济发展不断呈现出差异,对一次能源的需求差异也在不断变化,从而导致了我国二氧化碳排放的区域差异较为显著。东部地区经济发展最先起步,拉动了对能源消费的需求,促使了二氧化碳排放的增长;然后随着西部大开发战略的实施,国家发展的战略重点逐步西移,中西部地区经济得到快速的发展,二氧化碳排放量保持不断上升的趋势。

东部地区的工业经济总量在我国国民经济中占有较大的比重,在产业结构、能源结构比例以及技术水平等方面都与中西部地区存在明显的差异,总体而言,东部地区在二氧化碳排放总量上明显高于中西部地区,但单位 GDP 排放的二氧化碳相对较少。

借鉴各个能源机构提供的二氧化碳排放系数,以国家发改委能源研究所提供的碳排放系数  $0.67\text{kg-c/kgce}$  为依据,结合上一章提供的计算模型,参考《中国能源统计年鉴 2011》中分地区能源的消费数据,去估算各地区二氧化碳的排放

量，并折算成比例的形式，具体计算过程不再赘述，这里只提供最终各地区二氧化碳排放量占当年全国排放总量的比值，详细计算结果见表 4-1。

受地理位置、经济发展等因素的制约，根据国家统计局 2011 年 6 月 13 号的划分办法，将我国的经济区域划分为东部、中部、西部和东北四大地区。其中东部地区主要包括东部沿海各个省份，中部地区主要包括山西、河南、安徽、湖北、湖南、江西等省份，西部地区主要包括重庆、四川、贵州、云南、广西、陕西、甘肃、青海、宁夏、西藏、新疆、内蒙古等省份，东北地区主要指东北三省。各经济区域的二氧化碳排放变化趋势详见图 4-1、4-2 和 4-3。

从图中可以明显的看出：东部地区的山东、河北、江苏、浙江和广东等省份的二氧化碳排放量较大，而且从 2002 年以来排放增长速度明显高于东部其他省份，原因在于这几个省份的工业经济发展水平较高，对能源特别是化石能源的需求量也较大，因此承担了较多的二氧化碳排放量；中部地区的河南、辽宁、山西、湖南和湖北等省份的二氧化碳排放量较大，特别是自 2004 年以来排放量增长较快，这与国家大力发展中部地区以及振兴东北地区的政策有很大的关系；西部地区四川和内蒙的二氧化碳排放量增长较为明显，特别是内蒙，随着国家能源战略重心的西移，内蒙地区优势的资源不断被开发，经济增长迅速，但伴随而来的二氧化碳排放量激增，这对该地区的生态环境都带来了很大的挑战。西部地区的新疆、宁夏、甘肃和青海等省份，也拥有丰富的资源，但由于远离消费市场，资源优势短期内难以实现转化，能源的开发利用程度相对较低，因此二氧化碳排放增长速度与内蒙相比缓慢。

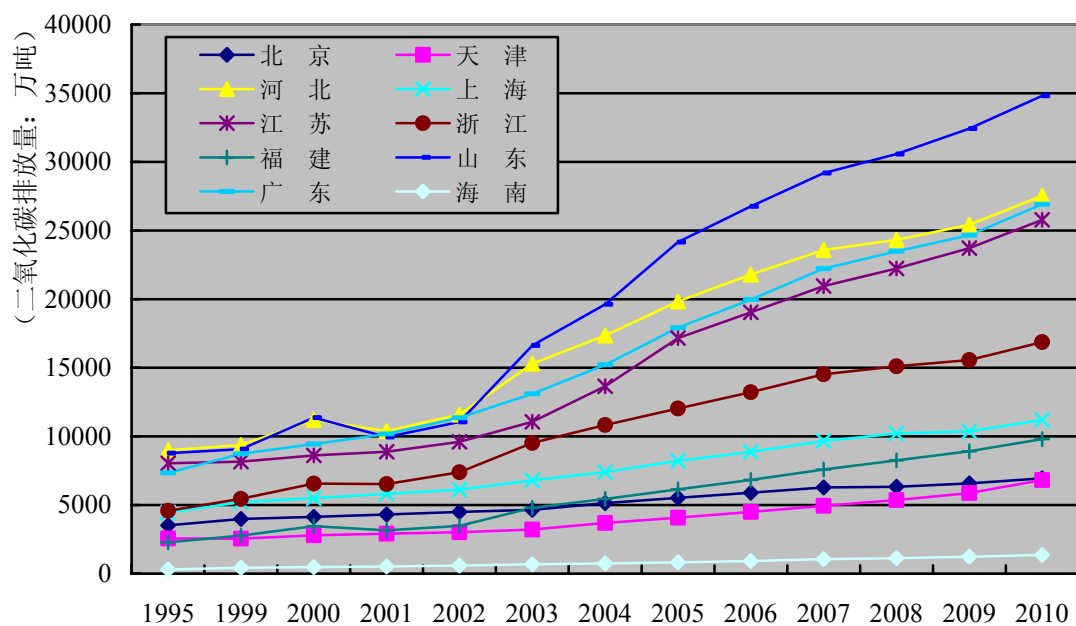


图 4-1 东部地区各省份二氧化碳排放变化趋势（1995-2010）

Fig.4-1 Carbon emissions trend changes in various provinces of eastern area (1995-2010)

表 4-1 分地区二氧化碳排放比重 (%)

Table 4-1 Proportion of regional emissions of carbon dioxide (%)

地 区	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010
北 京	2.84	2.63	2.75	2.10	2.03	1.97	1.87	1.84	1.79
天 津	2.17	1.92	1.86	1.55	1.55	1.55	1.59	1.64	1.75
河 北	6.42	6.73	7.44	7.53	7.50	7.39	7.20	7.12	7.07
山 西	4.94	6.29	4.47	4.84	4.85	4.89	4.64	4.36	4.32
内蒙古	2.54	1.97	2.36	3.67	3.86	4.01	4.18	4.30	4.32
辽 宁	8.24	7.24	7.08	5.17	5.16	5.19	5.27	5.35	5.38
吉 林	3.69	3.07	2.50	2.02	2.03	2.06	2.14	2.15	2.13
黑龙江	5.54	4.44	4.10	3.06	3.01	2.94	2.96	2.93	2.88
上 海	3.33	3.34	3.65	3.12	3.05	3.03	3.02	2.90	2.88
江 苏	5.78	6.02	5.72	6.52	6.55	6.57	6.58	6.64	6.62
浙 江	2.70	3.43	4.36	4.57	4.55	4.55	4.47	4.36	4.33
安 徽	2.89	3.14	3.24	2.47	2.43	2.43	2.47	2.49	2.49
福 建	1.52	1.71	2.30	2.33	2.35	2.38	2.44	2.50	2.52
江 西	1.82	1.79	1.66	1.63	1.60	1.58	1.59	1.63	1.63
山 东	7.16	6.57	7.55	9.17	9.21	9.15	9.05	9.08	8.94
河 南	5.46	4.84	5.26	5.55	5.59	5.59	5.62	5.53	5.50
湖 北	4.19	4.23	4.16	3.83	3.80	3.81	3.80	3.84	3.89
湖 南	4.01	4.06	2.70	3.69	3.64	3.65	3.66	3.73	3.82
广 东	4.26	5.50	6.27	6.80	6.87	6.97	6.95	6.90	6.91
广 西	1.37	1.78	1.77	1.85	1.86	1.88	1.92	1.98	2.03
海 南	0.13	0.23	0.32	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.35
重 庆	0.00	0.00	1.61	1.88	1.85	1.86	1.92	1.97	2.02
四 川	6.66	7.13	4.33	4.49	4.47	4.46	4.48	4.57	4.59
贵 州	2.24	2.38	2.84	2.14	2.12	2.13	2.10	2.12	2.10
云 南	2.05	1.98	2.30	2.29	2.28	2.24	2.22	2.25	2.23
陕 西	2.35	2.34	1.81	2.11	2.11	2.12	2.20	2.25	2.28
甘 肃	2.28	2.05	2.00	1.66	1.63	1.60	1.58	1.53	1.52
青 海	0.53	0.51	0.60	0.63	0.66	0.66	0.67	0.66	0.66
宁 夏	0.74	0.57	0.78	0.96	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95
新 疆	2.16	2.12	2.21	2.09	2.08	2.06	2.09	2.11	2.13
全 国	100	100	100	100	100	100	100	100	100

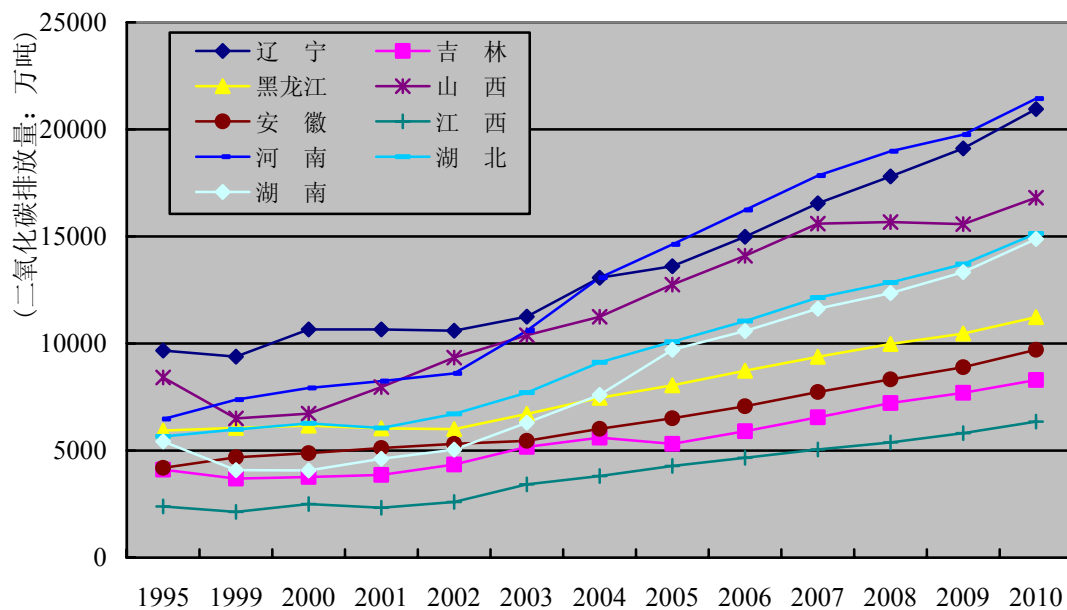


图 4-2 中部和东北地区各省份二氧化碳排放变化趋势（1995-2010）

Fig.4-2 Carbon emissions trend changes in various provinces of the central and northeastern areas (1995-2010)

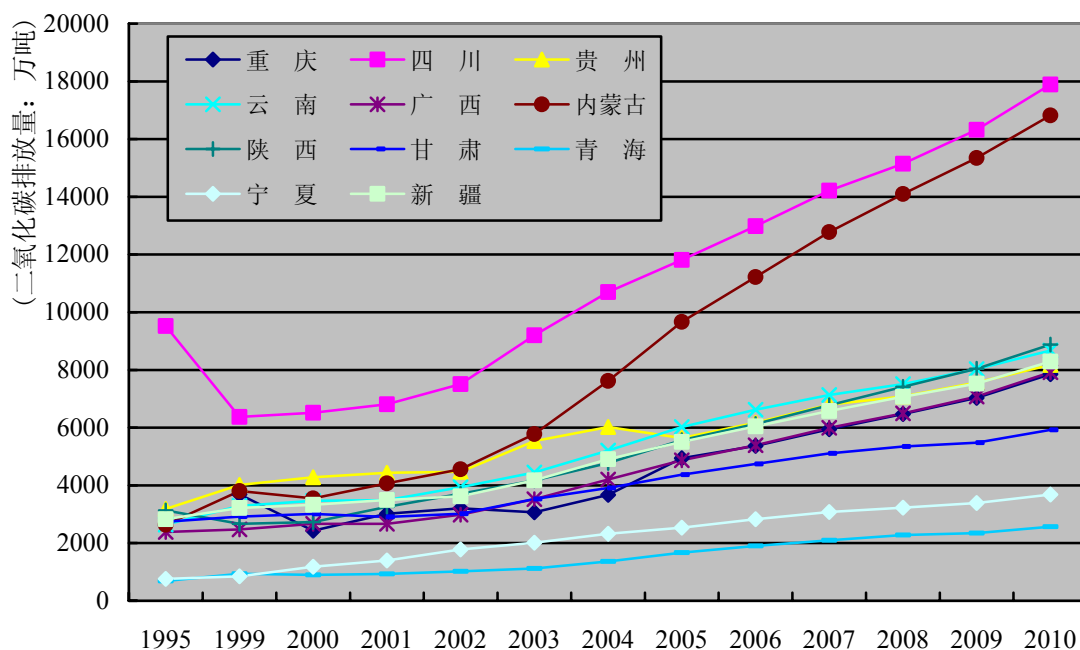


图 4-3 西部地区各省份二氧化碳排放变化趋势（1995-2010）

Fig.4-3 Carbon emissions trend changes in various provinces of western area (1995-2010)

#### 4.1.2 我国二氧化碳排放的行业特征

从上一章对我国二氧化碳排放源进行分析可知,我国能源活动所产生的二氧

化碳占二氧化碳排放总量的绝大部分,而能源活动最主要的排放来自化石燃料的燃烧。按照《中国能源统计年鉴》给出分行业的统计数据分类,主要分为七大类,不同行业受行业特点和行业发展水平等条件的制约,在国民经济发展中起到了不同的作用。

可参照 4.1.1 节中分地区二氧化碳排放的估算方法,求得分行业二氧化碳的排放情况,从而可以得到分行业二氧化碳的排放比重,详见表 4-2。

从表中数据可以看出,历年来各行业二氧化碳排放量相对稳定,在不同的行业中,工业排放的二氧化碳最多,基本上稳定在 71%左右;其次是生活消费,占比 11%左右;然后是交通运输、仓储和邮政业,占比 8%左右;第四是依次是其他行业;第五是批发、零售业和住宿、餐饮业以及农、林、牧、渔、水利业,最后是建筑业。

我国工业主要分为采掘业、制造业和电力、煤气及生产和供应业三大类。在三大分类中,制造业排放的二氧化碳占工业总排放量的 80%以上,其次为电力、煤气及生产和供应业,最后为采掘业。在采掘业大类中,排放较多二氧化碳的行业依次为煤炭开采和洗选业、石油和天然气开采业、黑色金属矿采选业、非金属矿采选业等;在制造业大类中,黑色金属冶炼及压延加工业排放比例最大,其余比例较大的依次为化学原料及化学制品制造业、非金属矿物制品业、石油加工、炼焦及核燃料加工业和有色金属冶炼及压延加工业;在电力、煤气及水生产和供应业中,电力、热力的生产和供应业占据此类排放量的绝大比重,其次是水和燃气生产和供应业,工业中主要行业二氧化碳排放走势详见图 4-4。以 2010 年的统计数据为例,制造业排放的二氧化碳在我国工业二氧化碳排放中占 81.57%,电力、煤气及生产和供应业占 10.47%,采掘业占 7.96%。在制造业中,黑色金属冶炼及压延加工业占整个工业排放量的 24.9%,化学原料及化学制品制造业占 12.85%,非金属矿物制品业占 11.98%,石油加工、炼焦及核燃料加工业占 7.18%,有色金属冶炼及压延加工业占 5.56%;在电力、煤气及水生产和供应业中,电力、热力的生产和供应业占了绝大部分,占整个工业排放量的 9.77%;而在采掘业中占较大比重的行业主要是煤炭开采和洗选业以及石油和天然气开采业,分别占整个工业排放量的 4.58%和 1.76%。这几大行业的二氧化碳排放量占工业行业总排放量的 78.56%。

表 4-2 我国分行业二氧化碳排放比重（1995-2010） 单位：%

Table 4-2 Proportion of carbon dioxide emissions by industry in China (1995-2010)

	农、林、牧、 渔、水利业	工业	建筑业	交通运输、仓 储和邮政业	批发、零售业和 住宿、餐饮业	其他 行业	生活 消费
1995	4.20	73.33	1.02	4.47	1.54	3.45	12.00
1996	2.73	71.64	1.47	7.41	2.02	3.89	10.85
1997	2.72	71.66	1.50	7.42	2.02	3.89	10.80
1998	2.71	71.51	1.55	7.44	2.04	3.90	10.85
1999	2.69	71.32	1.52	7.63	2.05	3.94	10.85
2000	2.69	71.31	1.50	7.72	2.09	3.96	10.73
2001	2.74	71.23	1.50	7.72	2.11	3.94	10.76
2002	2.72	71.25	1.51	7.72	2.12	3.91	10.76
2003	2.70	71.37	1.48	7.68	2.13	3.89	10.75
2004	2.67	71.45	1.46	7.80	2.10	3.86	10.67
2005	2.57	71.49	1.44	7.79	2.05	3.92	10.72
2006	2.45	71.50	1.45	7.84	2.05	3.97	10.73
2007	2.22	71.49	1.47	7.83	2.03	3.98	10.99
2008	2.06	71.81	1.31	7.86	1.97	4.04	10.94
2009	2.04	71.48	1.49	7.73	2.09	4.14	11.04
2010	1.99	71.12	1.92	8.02	2.10	4.21	10.64

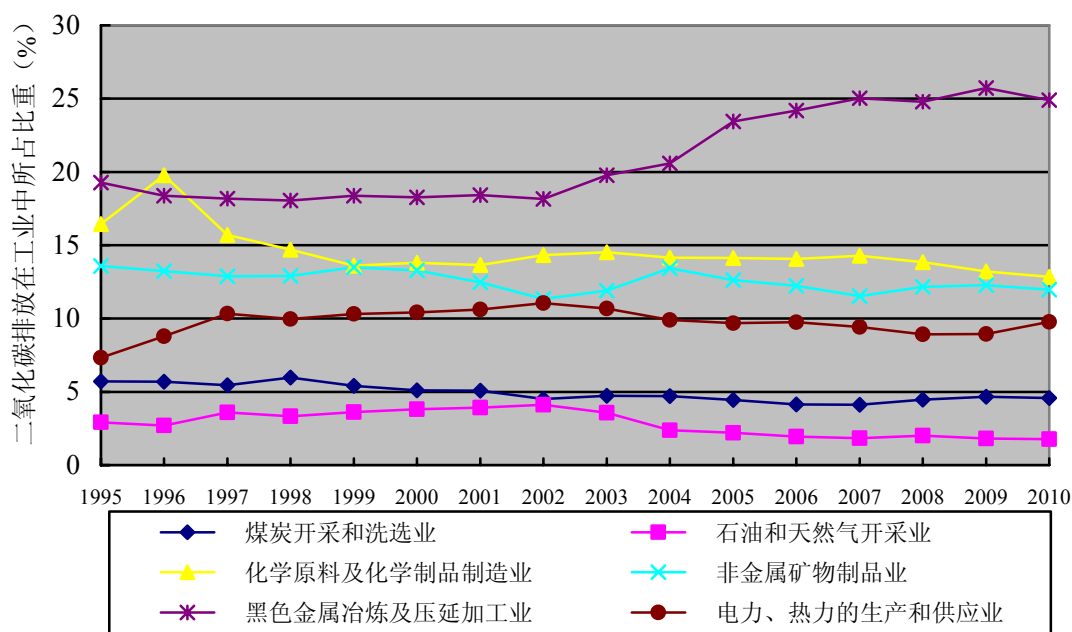


图 4-4 工业中主要行业二氧化碳排放走势

Fig.4-4 Trend of carbon dioxide emissions of the major industry

## 4.2 我国二氧化碳排放的影响因素分析

改革开放以来,随着我国经济的不断发展,二氧化碳的排放量逐年增多,尤



其是 2003 年以来,伴随着新一轮经济增长所带来的化石能源消费的迅速上升,二氧化碳排放增长速度更为迅猛,未来若要更好地实现节能减排目标,必须对二氧化碳排放的主要影响因素进行深入分析。

从第三章的分析可知,能源相关的活动排放了大量的二氧化碳,而且占全国二氧化碳排放总量的绝对比重。2004 年中国发布的《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》中给出了我国未来碳排放的主要影响因素为:人口增长和城市化、经济发展、人民生活基本需求与消费模式变化、经济结构调整与技术进步和林业与生态保护建设等。参照魏一鸣<sup>[137]</sup>、王锋<sup>[138]</sup>等学者对二氧化碳排放驱动因素的分析,可归纳出我国二氧化碳排放的主要影响因素为:人口数量、GDP、能源消费总量、能源结构、经济结构、城市化水平、工业化水平、能源强度、收入水平、技术进步、能源价格、交通工具数量、林业和生态保护建设等。

在这些排放影响因素中,有些因素是可以或比较容易实现量化的,比如人口数量、GDP、人均 GDP、能源消费总量、历年各类能源消费占比、产业结构比例、人均收入水平、能源价格、交通工具数量等,而城市化水平、工业化水平、技术水平以及林业和生态保护建设等因素不能或较难实现量化,或者说量化后容易出现以偏概全的情况。在上述的二氧化碳排放因素中,有些因素的预期变化可对二氧化碳排放起到正方向的作用,比如人口的增长、GDP 增长、能源消费总量上升、收入水平的提高、城市化和工业化加速推进、交通工具数量的增加等,而有些因素的预期变化会对二氧化碳排放起到负方向的作用,会抑制或减少二氧化碳的排放,如:化石能源在能源消费总量所占比重的降低、能源价格的上涨、燃料利用技术的改进和创新、林业和生态环境保护建设等。本文下面将着重分析部分主要因素对二氧化碳排放的影响。

## 4.3 各主要因素对二氧化碳排放的影响

### 4.3.1 人口增长对二氧化碳排放的影响

我国是世界上人口最多的国家,从 20 世纪 70 年代末我国实行计划生育政策以来,人口的增长速度逐渐变缓,出生率由 1978 年的 18.25‰ 下降到 2010 年的 11.90‰,人口自然增长率经历了 20 世纪 80 年代的短暂波动之后逐渐缓慢下降,由 1978 年的 12‰ 下降到 2010 年的 4.79‰,人口数量仍在不断增长,截止 2010 年,我国人口数量已达 13.4 亿人,目前我国人口增长已经进入低出生和低增长的阶段。我国人口的增长趋势详见图 4-5。

据相关中国人口增长的文献分析预测,随着人口增长速度的缓慢降低,人口数量将在 2030 年前后达到峰值,但由于人口基数较大,人口增长的绝对量依然较大,人口的增加意味着对能源、交通以及一些生活必需品的需求不断增大,能源需求的增加、交通工具及设施的增多、以及加大生活必需品的生产和加工都会

在某种程度加大对化石燃料的燃烧，从而加大二氧化碳的排放；另外，在贫困落后地区人口数量的增多，将会加大生活用能的需求，从而会加大对林地的破坏程度，客观上会加大二氧化碳的排放力度。因此，人口增长所带来的二氧化碳排放量仍会保持一定规模的增长，而且不可避免地继续增长。

从减少二氧化碳排放角度入手，在当前中国国情下，继续实施计划生育国策，仍十分有必要，实行计划生育政策可以有效的降低人口出生率和自然增长率，减少过多人口对环境造成的压力，从而从客观上减少或抑制二氧化碳的排放。

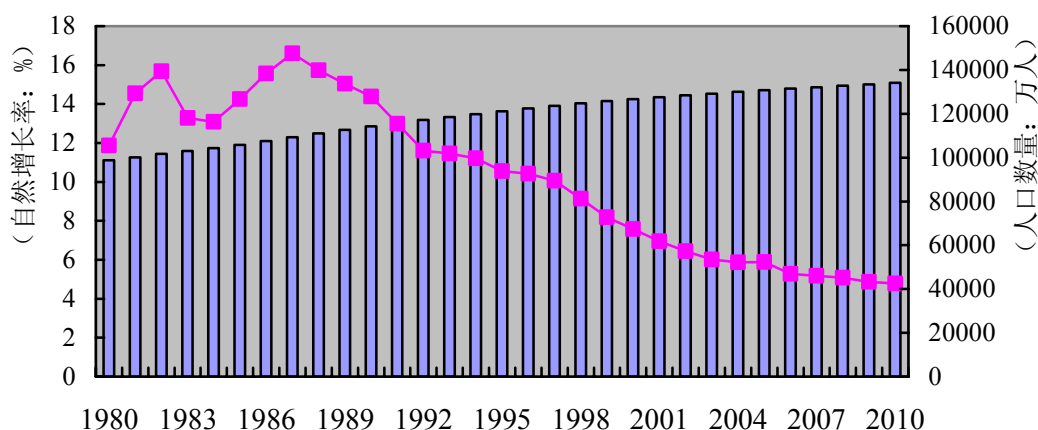


图 4-5 我国人口增长趋势图（1980-2010 年）

Fig.4-5 Trend of China's population growth (1980-2010)

#### 4.3.2 经济增长对二氧化碳排放的影响

目前，我国整体上处于工业化的中期阶段，经济的增长对能源、原材料、交通运输的需求压力较大，在今后相当长的一段时间内，这些高耗能的部门仍是我国最主要的基础产业部门。随着我国工业化的不断推进，大规模的基础设施建设对高耗能产品的需求也不断增加，伴随着高耗能产品产量的持续增长，二氧化碳的排放量也会不断的增长。

从发达国家发展历程可以看出，工业化国家经济发展与碳排放关系一般都需要经历碳排放强度、人均碳排放量和碳排放总量的三个“倒 U”形曲线。当一个国家处于“倒 U”形曲线左侧的爬升阶段时，经济的增长不可避免的带来二氧化碳排放的增多，该国处于经济增长和二氧化碳排放减少的两难困境中；当该国家处于“倒 U”形曲线右侧的下降阶段时，该国即会走出该困境，经济增长的同时二氧化碳排放量降低。可以考虑绘制我国人均二氧化碳排放与人均 GDP 的散点图，详见图 4-6。

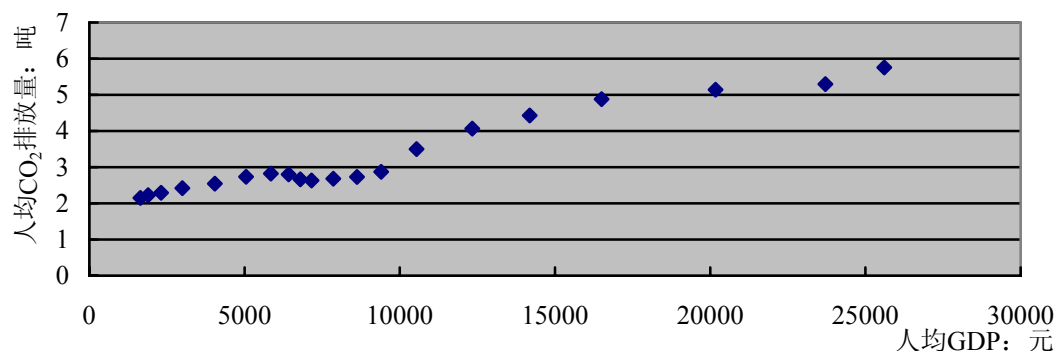


图 4-6 中国人均 CO<sub>2</sub> 排放量与人均 GDP 散点图 (1990-2009 年)

Fig.4-6 China's per capita CO<sub>2</sub> emissions and per capita GDP scatter diagram (1990-2009)

数据来源: 人均 CO<sub>2</sub> 排放数据来源: <http://unstats.un.org/unsd/mdg/SeriesDetail.aspx?srid=751> (联合国千年发展目标指标网站); 人均 GDP 数据来源于《中国统计年鉴 2011》

从图 4-6 可清晰地看出, 我国 1990-2009 年期间正处于“倒 U”形曲线左侧的爬升阶段。中国的人均 GDP 由 1990 年的 1644 元增长到 2009 年的 25607.5 元, 与此同时人均二氧化碳的排放量也由 1990 年的 2.1488 吨增长到 2009 年的 5.7585 吨。从而可知中国目前仍处于经济增长和二氧化碳减排的两难困境。因此, 在未来一段时间内, 伴随着中国经济的不断发展, 二氧化碳的排放量将会持续增加, 靠减缓经济增长来实现二氧化碳减排的做法是不可取的, 故必须在低碳发展的背景下寻找新的途径来实现我国二氧化碳排放量的逐渐减少。

#### 4.3.3 能源结构对二氧化碳排放的影响

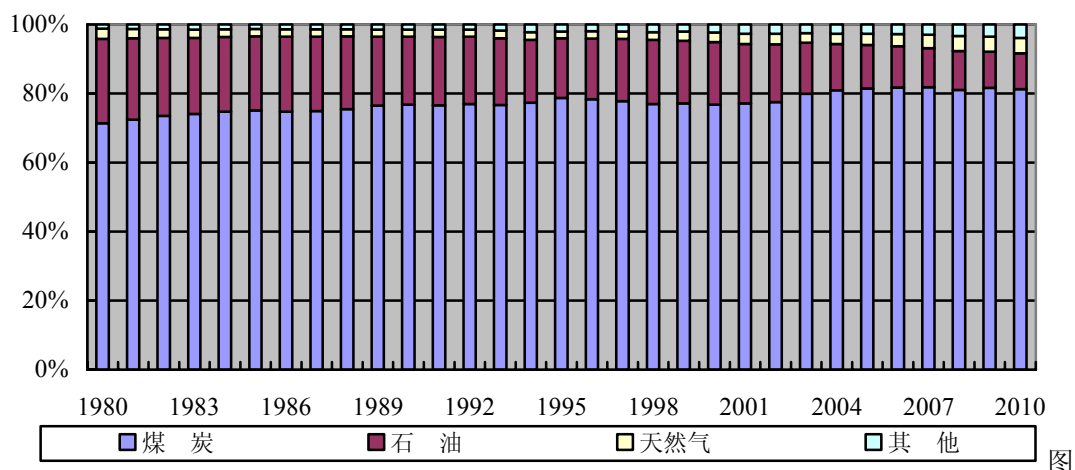
能源结构是指一次能源总量中各种能源的构成及其比例关系。一次能源可分为可再生能源和不可再生能源, 其中不可再生能源主要包括化石燃料和核能等。目前世界上大部分国家的主体能源都仍依赖化石燃料, 而化石燃料在燃烧的过程中会排放大量的二氧化碳, 但不同的化石燃料排放的二氧化碳量也有所不同, 这对二氧化碳排放量有很大的影响。

化石能源主要分为煤炭、石油和天然气三种, 根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》中给出的各个部门类别中固定源燃烧的缺失排放因子数据可知, 本文分别取煤炭、石油和天然气的排放因子下限值为参考依据, 煤炭的二氧化碳排放因子为 94600KG/TJ, 原油的二氧化碳排放因子为 73300 KG/TJ, 天然气的二氧化碳排放因子为 56100 KG/TJ。也就是说, 在提供相同热量的同时三种燃料排放的二氧化碳各不相同, 煤炭燃烧排放的二氧化碳分别是石油和天然气 1.29 和 1.69 倍。因此, 在提供相同热量的情况下, 能源结构对二氧化碳的排放影响较大。

我国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋特点决定了我国的能源生产和消费结构中煤炭所占据的主导地位。煤炭是我国的主体能源, 改革开放以来我国煤炭消

费的比重有所减少,但一直保持在70%以上,石油、天然气以及新能源占据的比重相对较少。依据《中国能源统计年鉴》数据,可描绘我国历年能源生产和消费结构情况,详见图4-7和4-8所示。

分析我国一次能源的生产和消费情况可知,在我国能源的生产结构中,煤炭占的比重最大,从1980年以来一直维持在70%以上,从2004年开始,随着经济发展对能源需求的拉动,煤炭的生产比例上升并维持在80%以上;石油占能源生产总量的比重有所下降,从1980年的24.4%下降到2010年的10.4%;而天然气和其他能源占能源生产总量的比重在逐年上升。而在能源消费结构中,近些年煤炭在能源消费总量中所占的比重有所下降,但一直维持在70%以上;石油的消费量在总量中的比重比较稳定,一直维持在20%左右;天然气和其他能源的比重有所上升,但一直占据的比例较小。所以提供同样热值的情况下,由于煤炭所占比例较大,所以总体排放的二氧化碳相对较多。



图

4-7 我国历年一次能源生产结构情况 (1980-2010)

Fig.4-7 China's annual primary energy production structure (1980-2010)

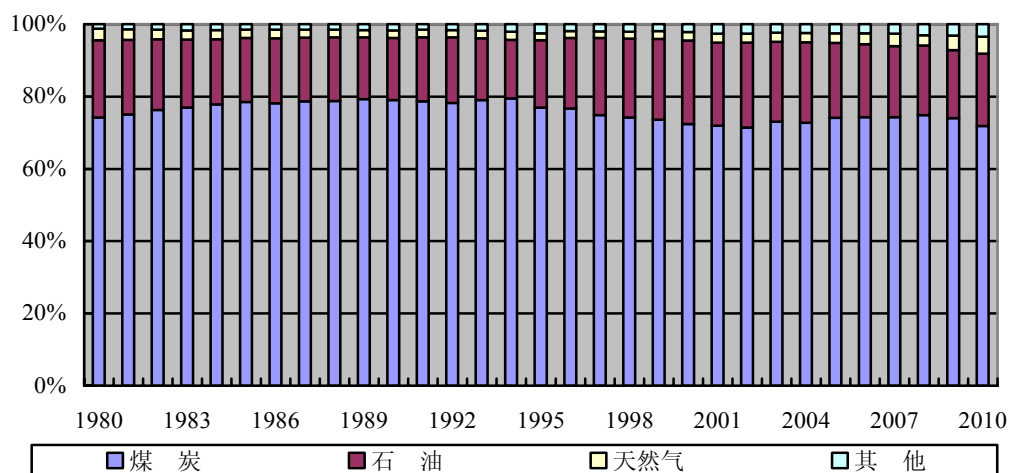


图 4-8 我国历年一次能源消费结构情况 (1980-2010)

Fig.4-8 China's annual primary energy consumption structure (1980-2010)

综合考虑能源安全、经济、环境等因素,我国的能源结构从长期的实践以及满足工业化发展的需求来看,总体上是较为合理的,它极大地保障了我国的能源安全。但是从长远来看,又存在许多不合理之处,下一步需要提高非煤炭类特别是天然气和新能源的比重,以减少二氧化碳的排放总量。

#### 4.3.4 工业化对二氧化碳排放的影响

工业化通常被定义为工业或第二产业产值(或收入)在国民生产总值中比重不断上升的过程,以及工业就业人数在总就业人数中比重不断上升的过程,是指一个国家由传统农业在国民生产总值中占统治地位转变为工业占统治地位的过程,也是工业生产活动取得主导地位的发展过程。工业发展是工业化的显著特征之一。

进入 21 世纪以来,我国工业经济快速发展,总体实力不断提高,工业在国民经济中的主导地位进一步增强。工业生产保持了高速增长态势,2011 年全年工业增加值达到 188572 亿元,比上年增长 10.7%,与 2000 年相比,是 2000 年的 4.77 倍。2003-2011 年,工业生产的增速在 8.7%至 14.9%之间波动,工业沿着经济增长的上升轨道稳健前行。历年工业经济的增加值及增长速度详见图 4-9。

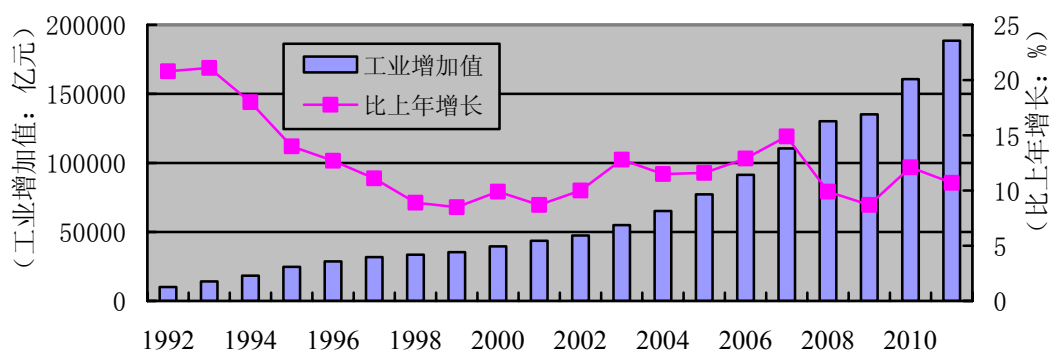


图 4-9 我国历年工业经济的增加值及增长速度 (1992-2011)

Fig.4-9 Added value and the growth rate of China's industrial economy over the years (1992-2011)

从图 4-9 可以看出,近几年连续的高速增长,工业经济总体规模不断扩大,各项经济指标快速发展,产品产量增长迅猛。工业对国内生产总值的贡献率都在 40%以上,2010 年更是达到了 49.2%,工业在国民经济中的主导地位进一步巩固,已经成为推动中国经济不断向前发展的重要因素,我国的工业化进程也在不断推进。

二氧化碳排放和工业化之间存在着很大的相关关系,据 IPCC《第四次评估报告》指出:“自 20 世纪中叶以来,大部分已观测到的全球平均气温升高很可能是由于人为温室气体排放所引起的”,工业的快速发展加速了对能源的需求,特别是对化石燃料的需求,正是化石燃料的使用致使排放了大量的温室气体特别是

二氧化碳，这才导致全球气候的变暖。但并没有绝对的证据证明工业化的发展并不必然引起碳排放的增加，而我国目前正处于工业化的中期阶段，离完成工业化还有相当长的一段路要走。这个过程中，对能源的需求将会继续增大，所以二氧化碳排放的增多也难以避免。

#### 4.3.5 城市化对二氧化碳排放的影响

改革开放以后，我国逐步放开了对人口流动的控制，大量农村人口流向了城市，同时也推动了城市化的进程。但由于长期以来我国的城市化发展相对较滞后于经济社会发展水平和工业化水平，因此进展相对缓慢。可考虑用城镇人口数量占总人口的比重来度量城市化水平，我国城市化率从 1980 年的 19.39% 增长到 2010 年的 49.95%，依然处于 30%~70% 之间，按照国际通行的标准我国目前处于城市化中期加速阶段。

城市化进程的加速，也使得我国的二氧化碳排放发生着明显的变化。城市是人口的集聚地，也是能源和资源相对集中消费的地区，城市的生活方式与农村相比有着显著的不同，本文取历年的统计数据说明这种差异，详见图 4-10。

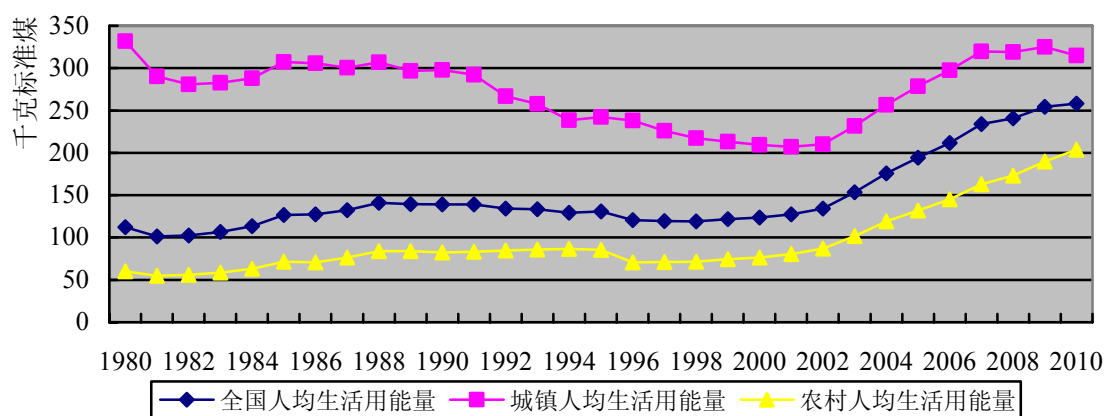


图 4-10 我国城乡人均生活用能量对比（1980-2010 年）

Fig.4-10 Comparison of China's urban and rural per capita energy of life (1980-2010)

从图 4-10 中可以看出，我国城镇人均生活用能水平明显高于全国人均生活用能量，更高于农村的人均用能水平，尽管自 2002 年来农村的人均用能水平逐年增高，但仍和城镇人均用能量存在较大差距，从 1980 年城镇人均用能水平是农村的 5.51 倍逐年减少到 2010 年的 1.55 倍，这就说明在满足生活需求所需能源消费方面城市远远高于农村，这就必然会带来更多的二氧化碳排放。

我国目前的城市化水平还在继续提高，随着城市化进程的推进，必然会导致生产生活方式发生重大转变，这一转变需要更为庞大的基础设施建设，需要更多的能源消耗，这对未来来说必将会加大二氧化碳的排放量，使得减排的压力变的更加困难。



#### 4.3.6 消费模式的变化对二氧化碳排放的影响

消费模式是指同消费资料相结合的方法和形式,是消费的表现形式。改革开放后,随着经济的飞速发展,和各种消费产品的极大丰富,人们对消费模式的追求也随之而变。由于受经济条件、社会文化、生命周期阶段、收入水平、职业等方面因素的影响,消费模式在不同的个体之间存在很大的差异。浪费型的消费者在消费的过程中,购买太多非必需品,最终导致物质资源的浪费;奢侈型和挥霍性的消费者消费水平较高,过于注重商品的档次,热衷于排场、体面上的消费,导致对资源造成更多的浪费;普通消费者更多关注的是经济适用;环保消费者更多关注的是消费行为对环境的破坏程度。不同的消费者消费模式不同,但消费产品的同时都会间接导致化石能源的消耗和二氧化碳的排放,尤其是前两种消费者必然会导致更多的二氧化碳排放。

消费模式的变化对二氧化碳的排放会产生很大的影响。科学合理的消费模式,有利于提高生活水平,在追求适度物质生活的同时,也会不断增加有益的精神文化消费。而且科学合理的消费模式在节约和环保的同时,也有利于保护自然资源和改善生态环境,易于创造一个适宜的生活环境。IPCC 在讨论温室气体减排政策和方案时曾指出:改变消费模式比单一的实施节能减排政策更为重要。

因此,应大力倡导和鼓励科学合理的消费模式,逐步培养人们绿色消费观念,这将有助于二氧化碳排放的减少。

#### 4.3.7 技术进步对二氧化碳排放的影响

2000 年,IPCC 发布了《排放情景特别报告》,报告指出了技术进步是解决未来温室气体排放和气候变化的决定性因素,其作用超过其他所有驱动因素之和。《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》指出:技术创新和技术进步是推动社会进步的重要因素,一些重要技术的开发、引进和普及,对提高能源效率,减少排放具有决定性的作用。如果发达国家遵守《公约》“共同但有区别的责任”的原则率先行动,将有利于推动全球的技术进步,特别是能源技术的进步,为世界各国社会经济的可持续发展提供更多的机遇,也有利全球温室气体的减排。

郑有飞<sup>[139]</sup>等引入动态气候变化综合评估模式,在对技术进步参数进行敏感性分析的基础上,结合我国节能减排目标进行气候经济学评估,通过分析结果得出,改进技术进步可以使我国的二氧化碳排放量减少。王铮<sup>[140]</sup>等建立了技术进步作用的二氧化碳减排经济影响的宏观经济模型,通过研究认为,可充分发挥技术进步的作用,促进经济发展的同时控制二氧化碳排放。魏巍贤<sup>[141]</sup>等采用内生增长理论与环境污染模型相结合,运用统计数据对我国二氧化碳的影响因素进行实证研究,并着重研究了技术进步对二氧化碳减排的贡献,研究结果表明,自主研发、技术引进对我国的二氧化碳减排具有显著的促进作用,但自主研发的消化

吸收能力较低，与技术引进形成的互补优势有待提高，而且技术进步对二氧化碳排放的影响呈现出明显的地区差异。

因此，我国实现节能减排的关键依赖于技术进步，发展低碳技术，提高生产率；注重引进国外的先进技术，加快技术的消化和吸收，并与国内的自主研发相结合，发挥两者的互补优势。另外要进一步加强和改善相关的基础设施和配套环境，使由技术进步所实现的二氧化碳减排功效最大化。

#### 4.3.8 林业与生态保护建设对二氧化碳排放的影响

森林、草地等生态环境对平衡大气中氧气和二氧化碳的浓度起着至关重要的作用。森林是氧气的主要制造者，同时也是二氧化碳的吸收转换者，它使得经济发展和人口增长过程中所多产生的二氧化碳得以平衡。近年来随着森林等生态环境的破坏，大气中二氧化碳被吸收和转化的越来越少，再加上森林遭受破坏还会释放出大量的温室气体，尤其是会增加大气中二氧化碳的浓度。

森林是陆地上最重要的生态系统，被称为是最大的碳库，森林植物通过光合作用将大气中的二氧化碳吸收并固定在植被与土壤当中，从而减少大气中二氧化碳浓度。

改革开放以来，我国大力开展植树造林活动，已成功实施“三北”防护林、长江中下游防护林、沿海防护林体系、黄河中下游防护林体系等林业生态工程。未来，我国将继续推行植树造林、退耕还林和退耕还草政策，全面推进天然林资源保护、风沙治理防护、防护林体系、自然保护区建设等重点生态建设工程的实施，进一步保护现有森林碳储存，增加陆地碳储存和吸收汇，进一步扩大二氧化碳的吸收汇，这对下一步我国二氧化碳的减排起到更大的促进作用。

### 4.4 本章小结

通过本章的分析可知，现阶段我国二氧化碳排放呈现出区域和行业特征，东部地区与中部地区、东北地区以及西部地区相比，排放了更多的二氧化碳；而在我国各行业中工业排放了大量的二氧化碳，工业中的制造业更是工业排放二氧化碳的主要源头。

之所以会造成上述二氧化碳的排放特征，是因为诸多二氧化碳排放的因素所致，影响因素有很多，本章主要以人口、经济发展、能源结构、工业化等作为主要的因素进行分析，但各个因素对二氧化碳排放影响有多大？下一章将采用指数分解模型对上述可量化的影响因素进行深入分析。



## 5 基于 LMDI 的指数分解模型的构建研究

本章在上一章对我国二氧化碳排放因素分析的基础上,借助指数分解模型对我国二氧化碳排放的影响因素进行研究。首先通过对相关模型进行对比分析,选择本文研究的主要模型;然后根据实际情况对模型进行改进,构建新的分解模型,并结合我国二氧化碳排放的现状进行实证研究;最后对模型进行分析并计算得出各个影响因素的贡献率,而且对运算结果进行分析概括,并对本章进行总结。

### 5.1 模型的选择

#### 5.1.1 指数分解方法的表达形式

据第二章基础理论部分介绍可知,在二氧化碳排放影响因素研究方面,研究机构和研究人员采用分解分析方法较多,但通行的方法主要有结构分解分析法(Structural Decomposition Analysis,简称 SDA)和指数分解分析法(Index Decomposition Analysis,简称 IDA)。与结构分解分析法利用投入产出表为基础对各个影响因素进行较为细致的分析相比,指数分解分析方法利用各产业部门各能源品种的加总数据对时间序列进行分析比较,可能更适应本文的研究。

指数分解分析方法基本思想是把一个目标变量分解成若干影响因素组合的形式,然后可以计算这若干个影响因素的贡献率,并按贡献率将各个影响因素区分开来,从而确定出几个影响较大的因素。

参照第二章的分析,本文考虑用两个分解实例来直观地说明指数分解模型:首先考虑 IPAT 方程为例

$$I = PAT \quad (5.1)$$

然后假设从时间 0 到 T,目标变量从  $I^0$  变化到  $I^T$ ,可以得出指数分解形式的表达式如下:

(1) 加法形式:

$$\Delta I_{tot} = I^T - I^0 = \Delta I_P + \Delta I_A + \Delta I_T + \Delta I_{rsd} \quad (5.2)$$

(2) 乘法形式:

$$D_{tot} = I^T / I^0 = D_P D_A D_T D_{rsd} \quad (5.3)$$

其中:  $\Delta I_P$  和  $D_P$  分别为人口因素对环境  $I$  影响的贡献值和贡献率,  $\Delta I_A$  和  $D_A$  分别为财富因素对环境  $I$  影响的贡献值和贡献率,  $\Delta I_T$  和  $D_T$  分别为人口因素对环境  $I$  影响的贡献值和贡献率,  $\Delta I_{rsd}$  和  $D_{rsd}$  分别为因素分解后剩余的残差项。

然后考虑二氧化碳排放分解为例，本文分别给出指数分解的加法和乘法形式：

$$C = \sum_i C_i = \sum_i (C_i / E_i)(E_i / E)(E / Y)(Y / P)P = \sum_i Q_i L_i I G P \quad (5.4)$$

其中：

$Q_i = C_i / E_i$ ，表示第  $i$  种燃料的二氧化碳排放系数；

$L_i = E_i / E$ ，表示第  $i$  种燃料在燃料总消费中的比例；

$I = E / Y$ ，表示能源强度；

$G = Y / P$ ，表示人均 GDP；

(1) 指数分解的加法形式：

$$\begin{aligned} \Delta C = C_T - C_0 &= \sum_i Q_{iT} L_{iT} I_T G_T P_T - \sum_i Q_{i0} L_{i0} I_0 G_0 P_0 \\ &= \Delta C_Q + \Delta C_L + \Delta C_I + \Delta C_G + \Delta C_P + \Delta C_{rsd} \end{aligned} \quad (5.5)$$

(2) 指数分解的乘法形式：

$$D_C = C_T / C_0 = \sum_i Q_{iT} L_{iT} I_T G_T P_T / \sum_i Q_{i0} L_{i0} I_0 G_0 P_0 = D_Q D_L D_I D_G D_P D_{rsd} \quad (5.6)$$

在指数分解分析的方法中，Laspeyres 和 Divisia 分解分析方法是更为常用的两种方法，下节对两种方法进行对比分析。

### 5.1.2 Laspeyres 分解法

Laspeyres 指数分解方法最早由美国斯坦福大学教授 Paul R. Ehrlich 提出，由于其易于计算和便于理解，后来被广泛应用于能源经济领域的分解分析研究，是一种较为常见的指数分解方法。

Laspeyres 指数分解方法的基本思想是：保持其他因素变量不变（或保持特定的值），直接对各个相关的因素变量进行微分，从而求出某一因素变化对目标量的影响。该指数分解方法的加法和乘法形式如下所示，以 5.1.1 节中的式 (5.4) 为例进行分析。

(1) 加法形式：

$$\begin{aligned} \Delta C = C_T - C_0 &= \Delta C_Q + \Delta C_L + \Delta C_I + \Delta C_G + \Delta C_P + \Delta C_{rsd} \\ &= \sum_i \Delta Q_i L_i I G P + \sum_i Q_i \Delta L_i I G P + \sum_i Q_i L_i \Delta I G P \\ &\quad + \sum_i Q_i L_i I \Delta G P + \sum_i Q_i L_i I G \Delta P + \Delta C_{rsd} \end{aligned} \quad (5.7)$$

其中： $\Delta C_Q = \sum_i \Delta Q_i L_i I G P$ ， $\Delta Q_i = Q_{iT} - Q_{i0}$ ，其余的各个因素的分解类似。

(2) 乘法形式：

$$\begin{aligned}
D_Q &= \sum_i Q_{iT} L_{i0} I_0 G_0 P_0 / \sum_i Q_{i0} L_{i0} I_0 G_0 P_0 ; \\
D_L &= \sum_i Q_{i0} L_{iT} I_0 G_0 P_0 / \sum_i Q_{i0} L_{i0} I_0 G_0 P_0 ; \\
D_I &= \sum_i Q_{i0} L_{i0} I_T G_0 P_0 / \sum_i Q_{i0} L_{i0} I_0 G_0 P_0 ; D_G = \sum_i Q_{i0} L_{i0} I_0 G_T P_0 / \sum_i Q_{i0} L_{i0} I_0 G_0 P_0 ; \\
D_P &= \sum_i Q_{i0} L_{i0} I_0 G_0 P_T / \sum_i Q_{i0} L_{i0} I_0 G_0 P_0 ; \\
D_C &= C_T / C_0 = \sum_i Q_{iT} L_{iT} I_T G_T P_T / \sum_i Q_{i0} L_{i0} I_0 G_0 P_0 = D_Q D_L D_I D_G D_P D_{rsd} \quad (5.8)
\end{aligned}$$

Laspeyres 分解方法由于变化因素分解不完全,可能存在较大的残差,对分解的结果造成影响,这是该方法最大的缺陷之处。

为了提高 Laspeyres 分解方法的准确度, Sun (1998) [142] 对 Laspeyres 模型进行改进,提出了一种完全分解模型。Laspeyres 完全分解模型在分解的过程中无残差项,而且能将残差项中忽略的影响效果补充到计算结果中。以 5.1.1 节中的式 (5.4) 为例,对 Laspeyres 完全分解模型分解得到的加法形式进行分析。

$$\begin{aligned}
\Delta C_Q &= \sum_i \Delta Q_i L_{i0} I_0 G_0 P_0 + 1/2 (\sum_i \Delta Q_i \Delta L_i I_0 G_0 P_0 + \sum_i \Delta Q_i L_{i0} \Delta I G_0 P_0 \\
&\quad + \sum_i \Delta Q_i L_{i0} I_0 \Delta G P_0 + \sum_i \Delta Q_i L_{i0} I_0 G_0 \Delta P) + 1/3 (\sum_i \Delta Q_i \Delta L_i \Delta I G_0 P_0 \\
&\quad + \sum_i \Delta Q_i \Delta L_i I_0 \Delta G P_0 + \sum_i \Delta Q_i \Delta L_i I_0 G_0 \Delta P + \sum_i \Delta Q_i L_{i0} \Delta I \Delta G P_0 \\
&\quad + \sum_i \Delta Q_i L_{i0} \Delta I G_0 \Delta P + \sum_i \Delta Q_i L_{i0} I_0 \Delta G \Delta P) + 1/4 (\sum_i \Delta Q_i \Delta L_i \Delta I \Delta G P_0 \\
&\quad + \sum_i \Delta Q_i \Delta L_i \Delta I G_0 \Delta P + \sum_i \Delta Q_i \Delta L_i I_0 \Delta G \Delta P + \sum_i \Delta Q_i L_{i0} \Delta I \Delta G \Delta P) \\
&\quad + 1/5 (\sum_i \Delta Q_i \Delta L_i \Delta I \Delta G \Delta P) \quad (5.9)
\end{aligned}$$

同理可以得出分解式中的  $\Delta C_L$ 、 $\Delta C_I$ 、 $\Delta C_G$  和  $\Delta C_P$ , 类似于式 (5.9) 的形式, 由于篇幅问题, 这里不再一一列举。

通过计算分析可知, 该模型可分解为:

$$\Delta C = C_T - C_0 = \Delta C_Q + \Delta C_L + \Delta C_I + \Delta C_G + \Delta C_P ; \Delta C_{rsd} = 0 \quad (5.10)$$

所以可知 Laspeyres 完全分解模型无残差值。

### 5.1.3 Divisia 分解法

Divisia 分解法是另一种常用的指数分解方法, 它的基本思路是: 将目标变量分解出的各个因素变量都看成是时间  $t$  的连续可微函数, 然后对时间进行微分, 并分解得出各个因素变量的变化对目标变量的贡献率。

根据 Divisia 指数分解法的概念, 可对目标量  $V$  进行微分运算:

$$\begin{aligned}
 dV / dt &= \sum_k \sum_i d(x_{1,i} x_{2,i} \cdots x_{k,i} \cdots x_{n,i}) / dt \\
 &= \sum_k \sum_i x_{1,i} x_{2,i} \cdots x_{k-1,i} x_{k+1,i} \cdots x_{n,i} dx_{k,i} / dt = \sum_k \sum_i V_i d(\ln x_{k,i}) / dt \quad (5.11)
 \end{aligned}$$

两边同时对时间积分，根据指数分解的加法形式可得：

$$\int_0^T dV / dt = \int_0^T \sum_k \sum_i V_i d(\ln x_{k,i}) / dt = \sum_k \int_0^T \sum_i V_i d(\ln x_{k,i}) / dt \quad (5.12)$$

$$\Delta x_{k,i} = \int_0^T \sum_i V_i d(\ln x_{k,i}) / dt \quad (5.13)$$

同理对等式两边同除以  $V^T$ ，并进行指数运算可得如下的乘法形式：

$$D_{x_{k,i}} = \exp \left\{ \int_0^T \sum_i \omega_i d(\ln x_{k,i}) / dt \right\} \quad (5.14)$$

不管是加法或者乘法形式，从式（5.13）和（5.14）可以看出求解比较困难，故采用近似计算，常见的两种 Divisia 指数分解法是算数平均迪氏指数分解法（Arithmetic Mean Divisia Index Method, AMDI）和对数平均迪氏指数分解法（Logarithmic Mean Divisia Index Method, LMDI）。下面分别给出两种方法的加法和乘法形式：

#### （1）AMDI

加法形式：

$$\Delta x_k = \sum_i 1/2(V_i^T + V_i^0) \ln(x_{k,i}^T / x_{k,i}^0) \quad (5.15)$$

乘法形式：

$$D_{x_k} = \exp \left\{ \sum_i 1/2(V_i^0 / V^0 + V_i^T / V^T) \ln(x_{k,i}^T / x_{k,i}^0) \right\} \quad (5.16)$$

#### （2）LMDI

加法形式：

$$\Delta x_k = \sum_i \frac{V_i^T - V_i^0}{\ln(V_i^T / V_i^0)} \ln(x_{k,i}^T / x_{k,i}^0) \quad (5.17)$$

乘法形式：

$$D_{x_k} = \exp \left\{ \sum_i \frac{(V_i^T - V_i^0) / \ln(V_i^T / V_i^0)}{(V^T - V^0) / \ln(V^T / V^0)} \ln(x_{k,i}^T / x_{k,i}^0) \right\} \quad (5.18)$$

以 5.1.1 节中的式（5.4）为例，分别给出 LMDI 方法的加法和乘法形式如下：

#### （1）加法形式：

$$\Delta C_Q = \sum_i \omega_i \ln(Q_i^T / Q_i^0) ;$$

$$\Delta C_L = \sum_i \omega_i \ln(L_i^T / L_i^0) ;$$

$$\begin{aligned}
\Delta C_I &= \sum_i \omega_i \ln(I_i^T / I_i^0); \\
\Delta C_G &= \sum_i \omega_i \ln(G_i^T / G_i^0); \\
\Delta C_P &= \sum_i \omega_i \ln(P_i^T / P_i^0); \\
\omega_i &= \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln(C_i^T / C_i^0)} \quad (5.19)
\end{aligned}$$

(2) 乘法形式:

$$\begin{aligned}
D_Q &= \exp\{\omega_i \ln(Q_i^T / Q_i^0)\}; \\
D_L &= \exp\{\omega_i \ln(L_i^T / L_i^0)\}; \\
D_I &= \exp\{\omega_i \ln(I_i^T / I_i^0)\}; \\
D_G &= \exp\{\omega_i \ln(G_i^T / G_i^0)\}; \\
D_P &= \exp\{\omega_i \ln(P_i^T / P_i^0)\}; \\
\omega_i &= \frac{(C_i^T - C_i^0) / \ln(C_i^T / C_i^0)}{(C^T - C^0) / \ln(C^T / C^0)} \quad (5.20)
\end{aligned}$$

可以证明 LMDI 是一种完全分解方法,但由于该方法在计算过程中产生分式和对数运算,故存在“0”值问题,即处于分母或对数位置的变量或表达式趋近于零,运算结果就趋近于无穷大。B.W. Ang 和 Na Liu 等分析给出了 LMDI 方法几种“0”值情况下的处理方法,详见表 5-1,本文以下研究若出现“0”值,均采用此方法。

表 5-1 LMDI 方法中“0”值的处理方法

Table 5-1 Processing method of the value of "0" in LMDI

序号	$X_i^0$	$X_i^T$	$V^0$	$V^T$	$\Delta V_{x_i} = (V^T - V^0) \ln(X_i^T / X_i^0) / \ln(V^T / V^0)$
1	0	+	0	+	$\Delta V_{x_i} = V^T$
2	+	0	+	0	$\Delta V_{x_i} = -V^0$
3	0	0	0	0	0
4	+	+	0	+	0
5	+	+	+	0	0
6	+	+	0	0	0
7	+	0	0	0	0
8	0	+	+	+	0

#### 5.1.4 本文研究方法的选择

由上述对各种分解方法的分析可知，在能源和碳排放研究领域，指数分解的方法很多，而且各自有缺陷之处，究竟哪一种是最好的方法，学术界尚未达成共识。

B.W. Ang 和 F. Q. Zhang<sup>[143][144]</sup>对能源领域的分解方法进行分析研究，并通过具体的算例进行对比，最后得出 LMDI 可能更适合对能源领域的问题进行分解研究。鉴于 LMDI 分解方法没有残差等特性，本文借鉴上述学者的研究成果，选取可量化的二氧化碳排放影响因素进行分析，并采用 LMDI 方法对二氧化碳排放进行分解研究。

### 5.2 基于 LMDI 二氧化碳排放因素分解模型的构建

本文基于吴立波<sup>[145][146]</sup>的“三层完全分解法”为基础，在此基础上进行相应的改进和调整，参照可获得的能源统计数据，本文把我国二氧化碳总排放量可以分解为 30 个省级单位（台湾省、香港、澳门以及西藏自治区的若干相关数据缺失）的 7 个部门 8 种能源品种产生的二氧化碳总和。本文认同国外学者的一些观点，采用省级的数据对二氧化碳排放进行分解分析。

由于能源数据的缺失，省级行政单位只选取其中的 30 个作为研究对象；经济部门的划分参照《中国统计年鉴》中的划分方法，把“农、林、牧、渔业”简称为“农业”，把“交通运输、仓储和邮政业”简称为“交通运输业”，把“批发、零售业和住宿、餐饮业”简称为“商业”，其他依旧按照统计年鉴的名称，这样的划分可以保证数据与统计年检的一致性；能源品种的种类很多，纳入统计的常规能源主要有 5 大类，分别为煤、气、油、电和其他燃料，由于考虑省级数据的完整性，以及电力消耗不直接产生二氧化碳，故本文选择煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、和天然气 8 类进行分析。

#### 5.2.1 模型的建立

依据以上分析，本文建立如下所示的 LMDI 分解模型：

$$C = \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 C_{ijk} = \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \frac{C_{ijk}}{E_{ijk}} \times \frac{E_{ijk}}{E_{ij}} \times \frac{E_{ij}}{Y_{ij}} \times \frac{Y_{ij}}{Y_i} \times \frac{Y_i}{Y} \times \frac{Y}{P} \times P(UR + RP) \\ + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=7}^8 \sum_{k=1}^8 \frac{C_{ijk}}{E_{ijk}} \times \frac{E_{ijk}}{E_{ij}} \times \frac{E_{ij}}{Y_{ij}} \times \frac{Y_{ij}}{Y_i} \times Y_i \quad (5.21)$$

其中  $i$  代表省份， $i=1,2,\dots,30$ ； $j$  代表部门， $j=1,2,\dots,7$ ，分别指农业、建筑业、交通运输业、商业、其他、工业和民用； $k$  代表能源品种，分别代表原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气， $k=1,2,\dots,8$ 。

式 (5.21) 可进一步整理得:

$$\begin{aligned}
 C = & \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times FS_{ijk} \times EI_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times PCG \times P \times RP \\
 & + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times FS_{ijk} \times EI_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times PCG \times P \times UR \\
 & + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=7}^8 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times FS_{ijk} \times IEI_{ij} \times IES_{ij} \times Y_i
 \end{aligned} \quad (5.22)$$

模型中各变量含义详见表 5-2, 模型的框架结构如图 5-1。

表 5-2 模型中变量的符号及其代表的含义

Table 5-2 Symbols of the variables in the model and their meanings

变量	表示的含义	变量	表示的含义
C	CO <sub>2</sub> 排放总量	CI <sub>ijk</sub>	第 i 省第 j 个部门第 k 种燃料的 CO <sub>2</sub> 排放强度
C <sub>ijk</sub>	第 i 省第 j 个部门第 k 种燃料 CO <sub>2</sub> 排放量	FS <sub>ijk</sub>	第 i 省第 j 个部门第 k 种燃料的消费比例 (能源结构)
E <sub>ijk</sub>	第 i 省第 j 个部门第 k 种燃料的消费量	EI <sub>ij</sub>	第 i 省第 j 个部门能源消费强度
E <sub>ij</sub>	第 i 省第 j 个部门的能源消费量	ES <sub>ij</sub>	第 i 省第 j 个部门的结构比重
Y <sub>ij</sub>	第 i 省第 j 个部门的经济产出	GS <sub>i</sub>	第 i 省的经济产出比例
Y <sub>i</sub>	第 i 省的经济总产出	PCG	人均 GDP
Y	我国的 GDP	P	人口数量
P	我国的人口数量	IEI <sub>ij</sub>	工业部门的能源消费强度
RP	我国农村人口比例	IES <sub>ij</sub>	第 i 省的工业化水平
UR	我国城镇化水平		

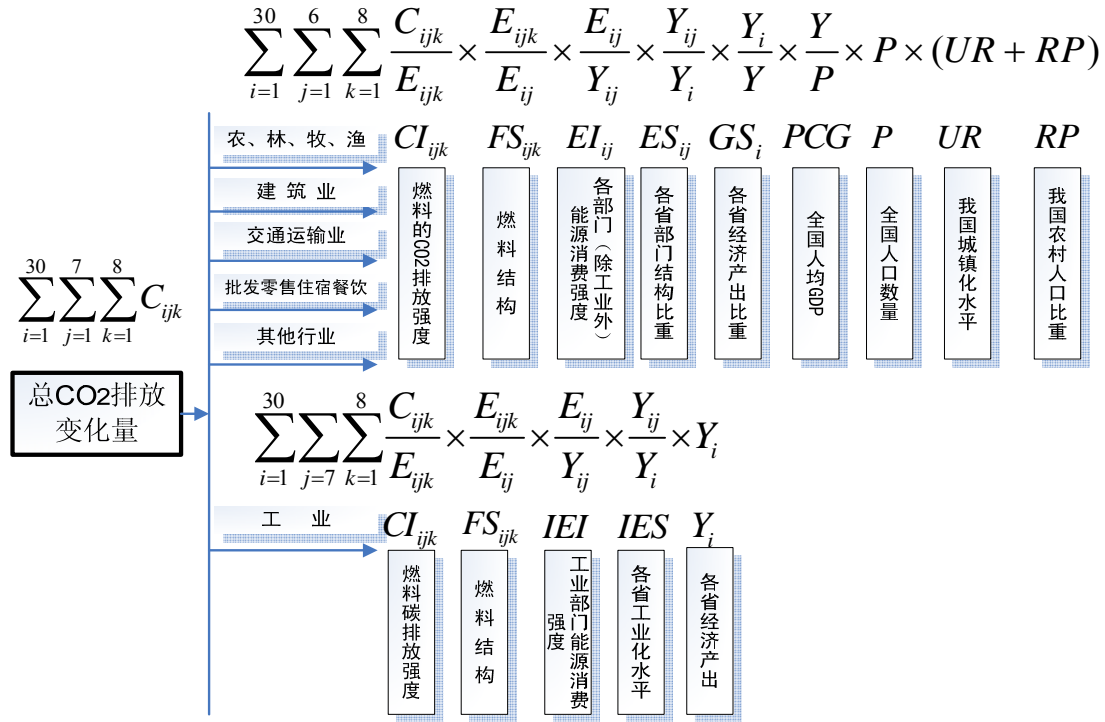


图 5-1 本章分解模型的框架结构图

Fig. 5-1 Framework of the decomposition model

等式 (5.22) 两端对时间  $t$  求导, 可得 CO<sub>2</sub> 排放总量的瞬时增长率:

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} = & \left( \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 \frac{dCI_{ijk}}{dt} \times FS_{ijk} \times EL_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times PCG \times P \times RP + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times \frac{dFS_{ijk}}{dt} \right. \\ & \times EL_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times PCG \times P \times RP + \cdots + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times FS_{ijk} \times EL_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times \\ & \left. PCG \times P \times \frac{dRP}{dt} \right) + \left( \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 \frac{dCI_{ijk}}{dt} \times FS_{ijk} \times EL_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times PCG \times P \times UR + \right. \\ & \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times \frac{dFS_{ijk}}{dt} \times EL_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times PCG \times P \times UR + \cdots + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times FS_{ijk} \\ & \times EL_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times PCG \times P \times \frac{dUR}{dt} \left. \right) + \left( \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=7}^8 \sum_{k=1}^8 \frac{dCI_{ijk}}{dt} \times FS_{ijk} \times IEI_{ij} \times IES_{ij} \times Y_i \right. \\ & + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=7}^8 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times \frac{dFS_{ijk}}{dt} \times IEI_{ij} \times IES_{ij} \times Y_i + \cdots + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=7}^8 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times FS_{ijk} \times IEI_{ij} \times IES_{ij} \\ & \left. \times \frac{dY_i}{dt} \right) \end{aligned} \quad (5.23)$$

等式 (5.23) 两边同时除以  $C$ , 整理可得:



$$\begin{aligned}
\frac{1}{C} \frac{dC}{dt} = & \left( \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 \frac{1}{CI_{ijk}} \frac{dCI_{ijk}}{dt} \frac{CI_{ijk}}{C} \times FS_{ijk} \times EI_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times PCG \times P \times RP + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 \right. \\
& CI_{ijk} \times \frac{1}{FS_{ijk}} \frac{dFS_{ijk}}{dt} \frac{FS_{ijk}}{C} \times EI_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times PCG \times P \times RP + \cdots + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times FS_{ijk} \times \\
& EI_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times PCG \times P \times \frac{1}{RP} \frac{dRP}{d} \frac{RP}{C} \left. \right) + \left( \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 \frac{1}{CI_{ijk}} \frac{dCI_{ijk}}{dt} \frac{CI_{ijk}}{C} \times FS_{ijk} \times \right. \\
& EI_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times PCG \times P \times UR + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times \frac{1}{FS_{ijk}} \frac{dFS_{ijk}}{dt} \frac{FS_{ijk}}{C} \times EI_{ij} \times ES_{ij} \times \\
& GS_i \times PCG \times P \times UR + \cdots + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times FS_{ijk} \times EI_{ij} \times ES_{ij} \times GS_i \times PCG \times P \times \frac{1}{UR} \\
& \frac{dUR}{dt} \frac{UR}{C} \left. \right) + \left( \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=7}^8 \sum_{k=1}^8 \frac{1}{CI_{ijk}} \frac{dCI_{ijk}}{dt} \frac{CI_{ijk}}{C} \times FS_{ijk} \times IEI_{ij} \times IES_{ij} \times Y_i + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=7}^8 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times \right. \\
& \frac{1}{FS_{ijk}} \frac{dFS_{ijk}}{dt} \frac{FS_{ijk}}{C} \times IEI_{ij} \times IES_{ij} \times Y_i + \cdots + \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=7}^8 \sum_{k=1}^8 CI_{ijk} \times FS_{ijk} \times IEI_{ij} \times IES_{ij} \times \frac{1}{Y_i} \\
& \left. \frac{dY_i}{dt} \frac{Y_i}{C} \right) \quad (5.24)
\end{aligned}$$

不妨假定  $\omega_{ijk} = CI_{ijk} / C$ ，代入式 (5.24)，并对该式在 0 到 T 时刻进行积分，

通过整理可得：

$$\begin{aligned}
\int_0^T \frac{d \ln C}{dt} dt = & \int_0^T \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk} \left( \frac{d \ln CI_{ijk}}{dt} + \frac{d \ln FS_{ijk}}{dt} \times \frac{d \ln EI_{ij}}{dt} \times \frac{d \ln ES_{ij}}{dt} \times \frac{d \ln GS_i}{dt} \times \right. \\
& \frac{d \ln PCG}{dt} \times \frac{d \ln P}{dt} \times \frac{d \ln RP}{dt} \left. \right) dt + \int_0^T \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk} \left( \frac{d \ln CI_{ijk}}{dt} + \frac{d \ln FS_{ijk}}{dt} \times \frac{d \ln EI_{ij}}{dt} \right. \\
& \times \frac{d \ln ES_{ij}}{dt} \times \frac{d \ln GS_i}{dt} \times \frac{d \ln PCG}{dt} \times \frac{d \ln P}{dt} \times \frac{d \ln UR}{dt} \left. \right) dt + \int_0^T \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=7}^8 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk} \left( \frac{d \ln CI_{ijk}}{dt} \right. \\
& \times \frac{d \ln FS_{ijk}}{dt} \times \frac{d \ln IEI_{ij}}{dt} \times \frac{d \ln IES_{ij}}{dt} \times \frac{d \ln Y_i}{dt} \left. \right) dt \quad (5.25)
\end{aligned}$$

式 (5.25) 经过整理可得：

$$\frac{C^T}{C^0} = \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{CI_{ijk}^T}{CI_{ijk}^0} \right] \times \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{FS_{ijk}^T}{FS_{ijk}^0} \right]$$

$$\begin{aligned}
& \times \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{EI_{ij}^T}{EI_{ij}^0} \right] \times \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{ES_{ij}^T}{ES_{ij}^0} \right] \\
& \times \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{GS_i^T}{GS_i^0} \right] \times \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{PCG^T}{PCG^0} \right] \\
& \times \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{P^T}{P^0} \right] \times \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{RP^T}{RP^0} \right] \\
& \times \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{UR^T}{UR^0} \right] \times \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{IEI_{ij}^T}{IEI_{ij}^0} \right] \\
& \times \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{IES_{ij}^T}{IES_{ij}^0} \right] \times \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{Y_i^T}{Y_i^0} \right] \quad (5.26)
\end{aligned}$$

其中  $\omega_{ijk}(t^*)$  是权重函数  $\omega_{ijk} = C_{ijk} / C$  在时刻  $t^*$  的函数值,  $t^* \in (0, T)$ 。对数权重函数的定义如下:

$$L(x, y) = \begin{cases} (x - y) / (\ln x - \ln y), & x \neq y \\ x, & x = y \\ 0, & x = y = 0 \end{cases}$$

$$\omega_{ijk}(t^*) = \frac{L(C_{ijk}^T, C_{ijk}^0)}{L(C^T, C^0)} \quad (5.27)$$

式 (5.26) 还可以简写为:

$$C^T / C^0 = D_{tot} = D_{CI} \times D_{FS} \times D_{EI} \times D_{ES} \times D_{GS} \times D_{PCG} \times D_P \times D_{RP} \times D_{UR} \times D_{IEI} \times D_{IES} \times D_Y \quad (5.28)$$

式 (5.28) 可以理解为二氧化碳排放量的增长能分解为上述 12 种因素共同作用的结果。选取上述 12 种影响因素作为研究指标的主要原因是: 第一, 本文划分是基于统计年鉴中数据的可获得性, 以及统计数据的权威性考虑的, 三个层次的划分也是以《中国统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》中的部门和能源品种划分为基准; 第二, 从前两章的分析可知, 工业特别是制造业在全国二氧化碳排放中占据较大的比重, 因此本文将工业部门的能源消费强度和省级的工业化水平作为排放影响因素进行研究。第三, 由于我国工业化和城市化的不断推进, 城市化在二氧化碳排放的影响上也逐渐成为不可或缺的因素, 本文在将城市化水平作为排放因素的同时, 不可避免的添加另外一种影响因素即农村人口占全国人口的比重, 可能此项因素对二氧化碳的排放并没有直接的和显著的影响, 但可以通过模型借助统计分析其对二氧化碳排放增长造成的影响。

### 5.2.2 数据的选取及来源

本研究模型选取 1997-2010 年全国时间序列数据,以《中国统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》等统计年鉴上的数据为准,其中主要包括 GDP、全国人口数量、城市人口数量、各省的经济产出、各省分部门分能源品种的能源消费量、各省分部门的经济产出、燃料二氧化碳排放强度、各省的工业化水平等。之所以选取 1997 年以来的数据,是因为 30 个省份中重庆市从 1997 年成为直辖市,这样选取便于年度数据之间的对比分析。

全国人口数量、城镇人口数量和农村人口数量来源于《中国统计年鉴》中“人口”章节;国民生产总值、人均 GDP 和各地区经济产出数据来源于《中国统计年鉴》中“国民经济核算”小节;分地区工业产值数据来源于《中国统计年鉴》中“工业”章节;各地区分部门分能源品种消费量等相关数据来源于《中国能源统计年鉴》中“地区能源平衡表”章节;其它数据由《中国工业经济统计年鉴》以及各省统计年鉴整理得出。总量数据详见表 5-3,各地区分部门分能源品种数据由于数据量较大,在此不再一一列出,详细数据见历年统计年鉴。下一节结合以上统计数据对模型(5.26)进行求解。

表 5-3 模型中部分总量数据表  
Table 5-3 Part of the total data table in the model

年份	人口数量(人)		GDP (亿元)	人均 GDP (元)	工业产值 (亿元)	能源消费总量 (万吨标煤)
	城镇	农村				
1991	31203	84620	21826.2	1893	8087.1	103783
1992	32175	84996	26937.3	2311	10284.5	109170
1993	33173	85344	35260.0	2998	14188.0	115993
1994	34169	85681	48108.5	4044	19480.7	122737
1995	35174	85947	59810.5	5046	24950.6	131176
1996	37304	85085	70142.5	5846	29447.6	135192
1997	39449	84177	78060.9	6420	32921.4	135909
1998	41608	83153	83024.3	6796	34018.4	136184
1999	43748	82038	88479.2	7159	35861.5	140569
2000	45906	80837	98000.5	7858	40033.6	145531
2001	48064	79563	108068.2	8622	43580.6	150406
2002	50212	78241	119095.7	9398	47431.3	159431
2003	52376	76851	135174.0	10542	54945.5	183792
2004	54283	75705	159586.8	12336	65210.0	213456
2005	56212	74544	183618.5	14185	77230.8	235997
2006	58288	73160	215883.9	16500	91310.9	258676
2007	60633	71496	266411.0	20169	110534.9	280508
2008	62403	70399	315274.7	23708	130260.2	291448
2009	64512	68938	341401.5	25608	135239.9	306647
2010	66978	67113	403260.0	29992	160867.0	324939

资料来源:通过历年《中国统计年鉴》整理得出

另外，地区能源平衡表数据存在缺失，比如海南省缺少 2002 年度的地区能源平衡表数据、宁夏回族自治区缺少 2000-2002 年的能源平衡表数据等等。对待此类数据缺失，本文采取忽略缺失数据年前后各一年之间的年度数据对比分析，这对全国碳排放整体的分解分析结果影响不大。

### 5.3 模型计算与求解

从模型的数学表达式（5.26）和（5.28）可以看出，模型的数据量较大，因此可以考虑编写程序或运用 MATLAB 和 EXCEL 进行求解。

先考虑 CI 对二氧化碳排放的影响，由于 CI 代表的是燃料的  $\text{CO}_2$  排放强度，在燃料充分燃烧的情况下，CI 是个固定的值，从式（5.26）右端第一项可以看出，对数函数的值应该为零，这也说明在理想的情况下，燃料的  $\text{CO}_2$  排放强度对二氧化碳排放的贡献为零。但现实情况下，燃料的  $\text{CO}_2$  排放强度不是一个固定的量，它随着燃料的燃烧情况变动而变动，对二氧化碳排放的贡献也不为零，但这涉及到技术层面，不作为本文研究的主要内容。

下面以  $D_{FS}$  为例进行求解计算，由式（5.26）-（5.28）对比分析可知：

$$\begin{aligned}
 D_{FS} &= \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \omega_{ijk}(t^*) \ln \frac{FS_{ijk}^T}{FS_{ijk}^0} \right] \\
 &= \exp \left[ \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \frac{(C_{ijk}^T - C_{ijk}^0) / (\ln C_{ijk}^T - \ln C_{ijk}^0)}{(C^T - C^0) / (\ln C^T - \ln C^0)} \ln \left( \frac{E_{ijk}^T}{E_{ijk}^0} \frac{E_{ij}^0}{E_{ij}^T} \right) \right] \\
 &= \exp \left[ \frac{(\ln C^T - \ln C^0)}{(C^T - C^0)} \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \frac{(C_{ijk}^T - C_{ijk}^0)}{(\ln C_{ijk}^T - \ln C_{ijk}^0)} \ln \left( \frac{E_{ijk}^T}{E_{ijk}^0} \frac{E_{ij}^0}{E_{ij}^T} \right) \right] \\
 &= \exp \left[ \frac{\ln(C^T / C^0)}{(C^T - C^0)} \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^8 \frac{(C_{ijk}^T - C_{ijk}^0)}{\ln(C_{ijk}^T / C_{ijk}^0)} \ln \left( \frac{E_{ijk}^T}{E_{ijk}^0} \frac{E_{ij}^0}{E_{ij}^T} \right) \right] \quad (5.29)
 \end{aligned}$$

对上述模型求解，并以一年为时间间隔，可把 1997-2010 年期间每相邻两年作为一个时段，然后进行对比分析，对宁夏和海南等省数据缺失的年份可以略去计算。另外，在每一时段中可能会出现许多的“0”值问题，对待此类问题本文采取表 5-1 的做法对模型进行求解。

通过 Matlab 实现对公式（5.29）的求解，由于过程繁琐，此处不再赘述，只给出最后的求解结果，如表 5-4 所示。

表 5-4 式 (5.29) 的求解结果 (%)

Table 5-4 Solution (%) of equation (5.29)

	北 京	天 津	河 北	山 西	内 蒙 古	辽 宁	吉 林	黑 龙 江
1997-1998	0.022746	0.008771	-0.010573	-0.030682	0.249590	-0.110073	-0.001655	0.162970
1998-1999	0.002559	0.028210	0.024209	-0.018424	-0.007428	0.068509	0.010178	-0.127196
1999-2000	0.024345	-0.010496	0.026846	0.048726	-0.294922	-0.215407	-0.006841	-0.001839
2000-2001	0.064872	0.037442	0.015568	0.167289	0.000396	0.047188	0.000026	-0.013663
2001-2002	0.034715	-0.048455	0.063390	0.080910	0.006957	0.053081	0.012262	-0.057356
2002-2003	0.123796	0.019035	-0.055049	-0.004850	-0.009143	-0.300211	-0.023529	-0.094092
2003-2004	-0.046095	0.062824	0.106252	0.024207	-0.002969	-0.111152	-0.111491	-0.007952
2004-2005	-0.003600	0.006372	-0.000426	-0.048214	0.078129	-0.001028	-0.035172	0.035965
2005-2006	-0.007128	0.045247	0.009063	0.011763	0.054404	-0.041711	-0.019537	0.031374
2006-2007	0.021442	0.015724	-0.028972	0.022953	0.097740	0.059102	-0.005696	0.045233
2007-2008	0.022182	0.017010	0.092694	0.011083	0.002764	0.031893	0.073369	0.005449
2008-2009	0.001279	0.006349	0.035693	0.020249	0.042818	0.218994	0.003339	-0.049536
2009-2010	0.028156	0.010365	0.134652	0.069600	0.007627	-0.269534	-0.004353	-0.071793
	上 海	江 苏	浙 江	安 徽	福 建	江 西	山 东	河 南
1997-1998	0.173094	-0.089077	-0.011079	-0.005561	0.002148	0.012474	0.050012	0.019811
1998-1999	-0.129906	0.016218	-0.007017	-0.006147	0.079499	-0.001267	0.015524	-0.009216
1999-2000	0.008454	0.030552	-0.000752	-0.000243	-0.087929	0.008471	-0.015246	0.471594
2000-2001	0.002759	0.484677	-0.011092	-0.001858	-0.002240	0.008109	0.067815	-0.455682
2001-2002	-0.047321	-0.474098	-0.000571	0.002723	-0.025390	0.016988	0.037699	0.018953
2002-2003	0.035917	0.108128	0.030371	0.006594	-0.022415	0.045614	0.015096	0.027790
2003-2004	-0.004291	0.093612	-0.003427	0.015960	-0.018828	-0.027670	0.148631	0.014787
2004-2005	0.013195	0.117852	-0.061197	-0.000464	0.011318	-0.019021	0.101492	-0.025670
2005-2006	0.038311	0.060112	0.028716	-0.000494	-0.003695	0.019761	-0.015125	0.054891
2006-2007	0.009670	0.000986	0.018883	0.028455	-0.009884	0.008363	0.100248	0.034509
2007-2008	0.001654	0.041011	0.028977	-0.083136	-0.000333	-0.002776	-0.063707	0.023067
2008-2009	-0.012049	0.051114	0.000418	0.012561	0.049446	0.013758	0.064673	-0.026712
2009-2010	0.045775	0.057684	0.020319	-0.003627	0.016995	-0.017631	0.118675	0.024941
	湖 北	湖 南	广 东	广 西	海 南	重 庆	四 川	贵 州
1997-1998	0.019155	0.003630	0.067730	-0.015477	0.034517	-0.023792	-0.028514	0.058251
1998-1999	-0.006514	0.020622	0.022831	-0.006643	-0.027627	0.023374	0.095066	-0.045070
1999-2000	0.026237	0.004236	-0.046831	0.002878	-0.021563	0.038853	0.044268	0.007582
2000-2001	-0.019569	-0.006710	0.004270	-0.006127	0.015112	0.010920	0.072748	0.002132
2001-2002	0.026145	-0.003008	-0.004818	0.001945	0.000000	-0.037222	-0.044731	-0.011476
2002-2003	0.039752	-0.017711	-0.019634	-0.026859	0.000000	0.075765	-0.163848	-0.018676
2003-2004	-0.042967	0.001269	-0.001782	-0.054927	-0.040579	0.046394	0.028026	-0.025755
2004-2005	0.027454	-0.051759	-0.037795	0.000173	0.041817	-0.007307	0.154538	-0.003585
2005-2006	-0.021874	0.038505	0.022278	0.044243	0.037708	0.023020	-0.015697	0.012193
2006-2007	-0.080853	-0.010197	0.081302	0.003215	-0.017940	0.027448	0.055841	-0.006560

续表 5-4

2007-2008	0.011156	0.030394	0.023339	-0.008823	0.011415	-0.070848	-0.220622	0.031968
2008-2009	-0.045670	0.001528	0.169202	0.012283	-0.024691	-0.022340	0.001930	-0.018932
2009-2010	0.061242	-0.001951	-0.155263	-0.016624	0.014194	0.069654	0.272431	-0.001079
	云 南	陕 西	甘 肃	青 海	宁 夏	新 疆	各省加总	
1997-1998	-0.037754	-0.028671	0.004959	0.009620	-0.010230	-0.015927	0.480412	
1998-1999	0.022085	0.000601	0.009482	-0.007548	0.009451	-0.014590	0.033827	
1999-2000	-0.002806	-0.033086	0.015829	0.014702	0.000000	0.038112	0.073722	
2000-2001	0.002437	0.024796	0.002317	-0.020787	0.000000	0.122647	0.615791	
2001-2002	0.036018	-0.007401	0.018747	0.000630	0.000000	0.029644	-0.321037	
2002-2003	-0.030738	-0.210375	0.039205	0.002592	0.000000	0.091537	-0.335940	
2003-2004	-0.053563	0.048672	0.042930	0.016216	0.020407	0.000630	0.117367	
2004-2005	0.030160	-0.046631	0.001492	0.004785	-0.037664	-0.111986	0.133222	
2005-2006	-0.008241	0.053292	0.012143	-0.004008	0.025004	0.026527	0.511042	
2006-2007	0.007450	0.089477	0.013858	-0.018377	0.001170	0.031695	0.596286	
2007-2008	-0.010874	-0.001332	-0.009545	-0.022402	0.016622	0.000763	-0.017588	
2008-2009	-0.027531	-0.028237	0.003769	0.003850	0.003528	-0.037724	0.423360	
2009-2010	-0.019457	0.027740	-0.000175	0.013313	0.003371	0.040150	0.475396	

从模型的运算结果可以看出：1997-1998 年，各省能源结构（此处的能源结构主要是指化石燃料的结构）对二氧化碳排放增长贡献率之和为 0.48%，其中内蒙、上海、黑龙江、广东和山东等省的能源结构对二氧化碳排放增长贡献较大；1998-1999 年，各省能源结构对二氧化碳排放增长贡献率之和为 0.0338，其中四川、福建等省能源结构对二氧化碳排放增长贡献影响较大；1999-2000 年，各省能源结构对二氧化碳排放增长贡献率之和为 0.0737，其中河南、山西、四川、重庆、江苏等省的能源结构对该阶段二氧化碳增长影响较大；2000-2001 年，各省能源结构对二氧化碳排放增长贡献率之和为 0.6157，其中江苏、山西、新疆、北京、山东等省对该阶段二氧化碳排放增长影响较大；2001-2003 年间，各省的能源结构对二氧化碳排放增长贡献成负值，2003-2007 年，随着经济发展对能源需求的不断加大，各省能源结构对二氧化碳排放增长的贡献逐年增大，其中江苏、内蒙、山东等省的能源结构对该时间段的二氧化碳排放增长影响较大；2007-2008 年，各省能源结构对二氧化碳排放增长率再次出现负值，四川、重庆、山东、安徽等省能源结构对这个阶段二氧化碳排放增长出现负值起到较大的作用；2008-2009 年，各省能源结构对二氧化碳排放增长贡献率之和为 0.42336，该阶段辽宁、广东、山东、江苏、福建等省能源结构对该阶段碳排放增长贡献较大；2009-2010 年，各省能源结构对二氧化碳排放增长贡献率之和为 0.475396，四川、河北、山东、山西、重庆、湖北等省能源结构对该阶段二氧化碳排放增长贡献较大。

从整体上看,能源结构对二氧化碳排放增长起到正方向的作用,由此可以得出,各省化石燃料结构的调整对二氧化碳排放增长能起到一定的抑制作用。

然后采用同样的方法对公式(5.26-5.29)中其他各个影响因素进行求解,其中每个影响因素都涉及到各省的分量数据,由于数据量较大,此处不再一一列出,只给出我国二氧化碳排放增长影响因素的总量数据,详见表 5-5、图 5-2 和图 5-3。

表 5-5 我国二氧化碳排放增长的驱动因素及其贡献率

Table 5-5 Driving factors and its contribution rate of the growth of China's carbon dioxide emissions

变量名称		1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003
CO <sub>2</sub> 排放增长贡献率(%)		13.2171	4.5609	11.7974	15.0143	17.1469	13.3818
能源(燃料) 结构	FS	0.4804	0.0338	0.0737	0.6158	-0.3210	-0.3359
各部门(除工业) 能源消费强度	EI	1.3349	-1.2748	-1.0353	-0.0955	-0.3973	26.0092
各省经济结构比重	ES	0.4778	-0.2002	-0.3573	-0.1557	-0.4659	-19.0622
各省经济产出比重	GS	0.9833	-1.1479	-0.3100	-0.5730	0.1126	0.1649
人均 GDP	PCG	4.9828	5.2015	9.0893	8.8203	8.8289	3.0953
全国人口数量	P	0.8673	0.7675	0.7280	0.6749	0.6279	0.1542
我国城镇化水平	UR	4.1888	3.9382	3.8969	3.7856	3.6267	0.9286
我国农村人口比重	RP	-2.0285	-2.0344	-2.1448	-2.2175	-2.2583	-0.6141
工业部门能源消费强度	IEI	-3.3054	-4.7690	-8.3748	-3.8541	-2.7284	-0.7237
各省工业化水平	IES	-1.5975	-0.7749	0.7244	-0.9086	0.5525	0.3512
各省经济产出	Y <sub>i</sub>	6.8334	4.8211	9.5073	8.9222	9.5694	3.4144
变量名称	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010
CO <sub>2</sub> 排放增长贡献率	22.9307	39.6067	26.1089	24.8130	22.3102	14.6997	23.2919
FS	0.1174	0.1332	0.5110	0.5963	-0.0176	0.4234	0.4754
EI	-29.2516	4.0065	-0.9977	-1.2423	-1.0401	-0.7600	-1.9640
ES	23.2029	-3.0003	-0.7927	-0.9931	-0.8718	-0.4051	-0.9865
GS	2.0548	4.7193	-0.6141	-2.9571	1.0751	2.7209	1.7052
PCG	15.2033	13.0615	15.2957	19.4105	14.3392	6.6600	16.2440
P	0.5574	0.5726	0.5155	0.4890	0.4461	0.4337	0.4813
UR	2.8375	2.8215	3.0263	3.2431	2.0800	2.5290	3.2865
RP	-1.9837	-2.0748	-2.3458	-2.6659	-1.8034	-2.3035	-3.1762
IEI	-10.2478	0.9533	-6.2090	-9.2066	-9.3640	-1.0351	-13.5899
IES	2.6106	0.0606	2.5223	1.1966	1.6063	-3.3781	2.3857
Y <sub>i</sub>	17.8301	18.3533	15.1972	16.9424	15.8604	9.8146	18.4304

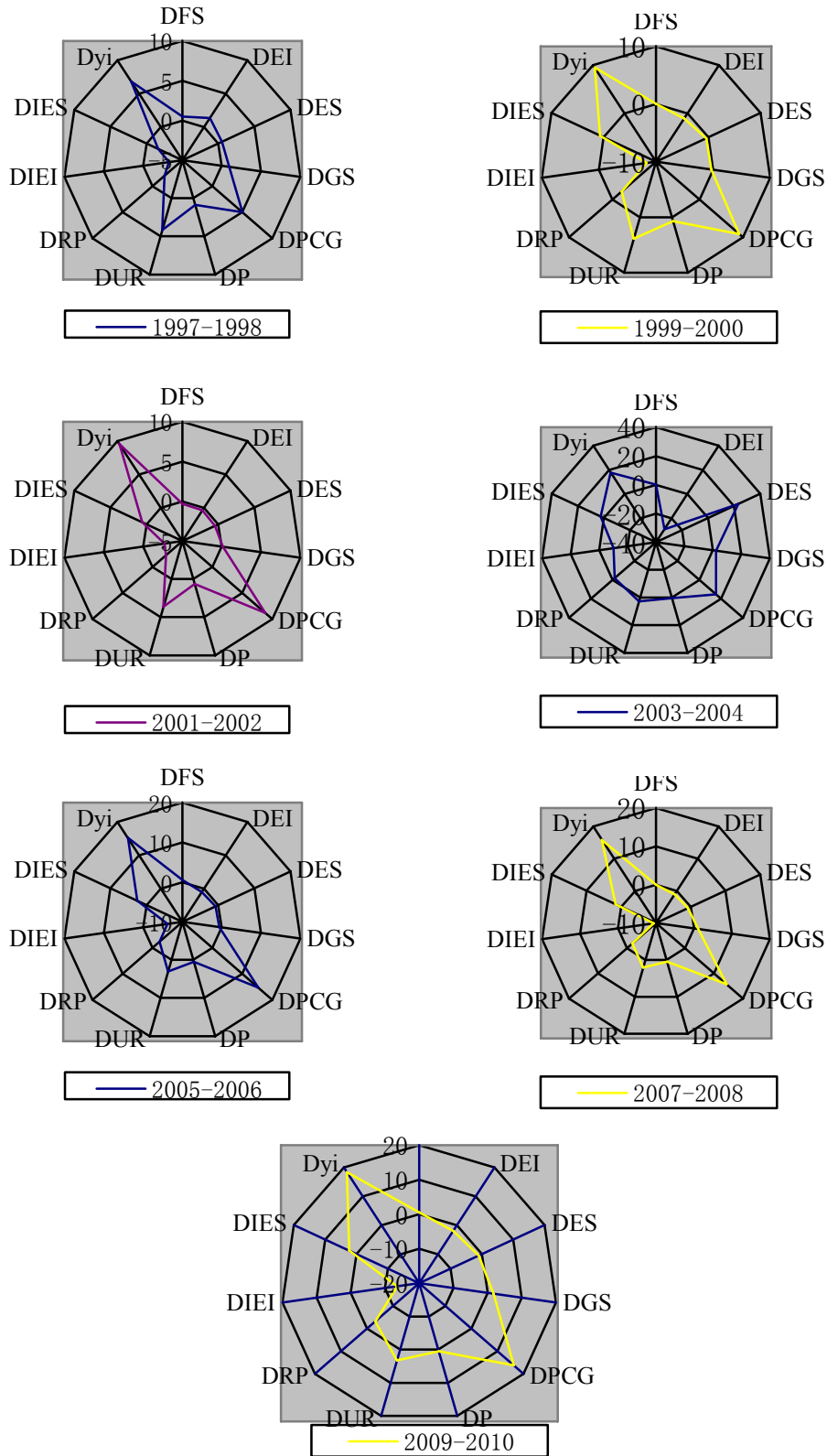
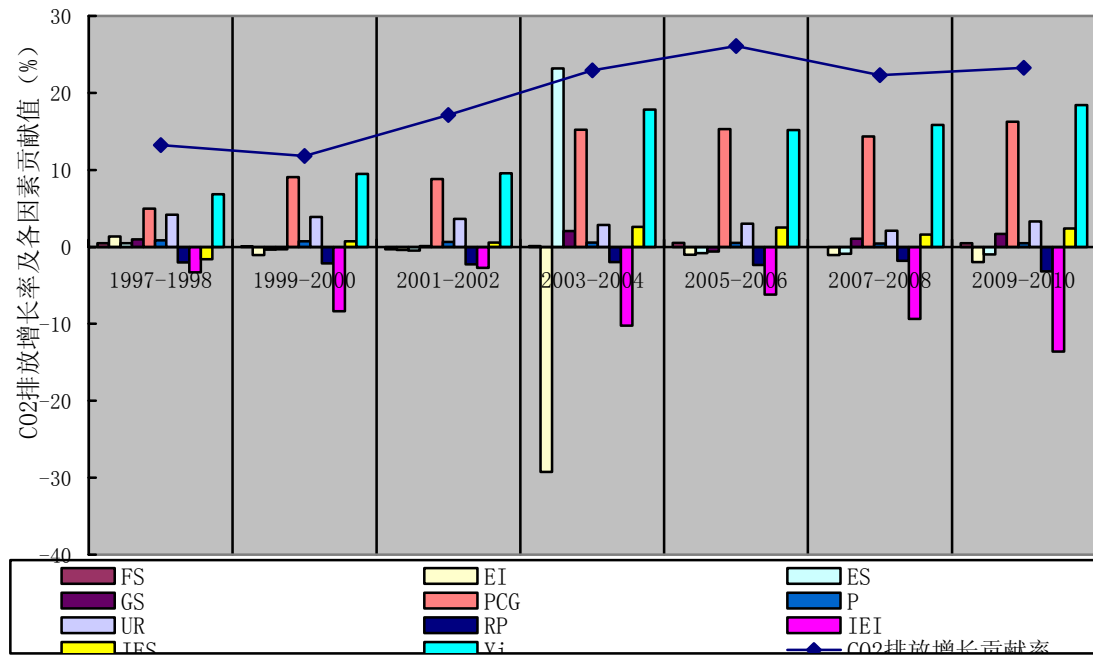


图 5-2 各个时期各影响因素贡献值对比

Fig. 5-2 Comparison of the contribution of each determinant



图 5-3 1997-2010 年我国 CO<sub>2</sub> 排放量增长的驱动因素及其贡献值Fig.5-3 Results of factor decomposition analysis for Chinese CO<sub>2</sub>emission from 1997-2010

## 5.4 计算结果分析

### 5.4.1 对各个时期影响因素进行分析

从 5.3 节对模型的分析以及运算结果可以看出,每个阶段二氧化碳的排放速度以及各个影响因素的贡献值都各不相同,本文模型涉及的驱动因素较多,下文将对每个时期主要的驱动因素进行分析。

(1) 1997-1998 年和 1998-1999 年,从表 5-5 总量数据可以看出,二氧化碳排放的增长速度变缓,影响 1997-1998 年二氧化碳排放增长的正向影响因素有:各省化石燃料的消费结构、各部门(除工业外)能源消费强度、各省部门结构比重、各省经济产出比重、人均 GDP、全国人口数量、城镇化水平和各省经济产出,上述因素变动对二氧化碳排放增长的贡献值分别为 0.4804%、1.3349%、0.4778%、0.9833%、4.9828%、0.8673%、4.1888%和 6.8334%;负向影响因素有我国农村人口比重、工业部门能源消费强度和各省工业化水平,其贡献值分别为 -2.0285%、-3.3054%和 -1.5975%。而影响 1998-1999 年二氧化碳排放增长的正向因素有人均 GDP、各省经济产出和城镇化水平,贡献值分别为 5.2015%、4.8211%和 3.9382%,其他的正向影响因素贡献值相对较小,而此时期的负向贡献因素相对较多,主要有工业部门能源消费强度、我国农村人口比重、各部门(除工业外)能源消费强度、各省经济产出比重,其贡献值分别为 -4.769%、-2.0344%、-1.2748%和 -1.1479%,各省经济结构比重和各省工业化水平贡献值相对较小。

从各省的分量数据来看，对正向因素中人均 GDP 和各省经济产出贡献较大的有河北、山东、湖北、山西、辽宁、广东、江苏、河南、湖南、四川、安徽等省，从上述各省所处地理位置分析，主要来自东部沿海地区，工业化水平较高，经济发展相对较快，对人均 GDP 的贡献值较大；对正向因素工业化水平影响较大的有河北、山东、四川、河南、山西、江苏、湖北等省，其中有较大一部分位于中部地区，近年来随着城镇化的不断推进，中部地区的城镇化水平有了较快的发展；而对负向影响因素中工业部门能源强度贡献较大的有辽宁、吉林、河北、浙江、湖南、广东、湖北、四川等省，这些省份单位工业产出所消耗的能源量相对较小，总体对二氧化碳排放起到反向增长的效果；对负向影响因素农村人口比重贡献较大的有河北、山西、辽宁、江苏、山东、河南、湖北、四川等省；该时期这些省份的农村人口比重对二氧化碳排放起到反向的作用；对负向影响因素各省工业化水平贡献较大的有山西、安徽、河南、广西、重庆、云南等省，这些省份主要位于中部地区，这个时期的工业化水平进展较快。

(2) 1999-2000 年和 2000-2001 年，二氧化碳排放平均增长率为 13.406%，其中主要的正向影响因素为各省的经济产出、人均 GDP 和城镇化水平，在 1999-2000 年和 2000-2001 年两个时期的贡献率分别为 9.507%和 8.922%、9.809%和 8.82%、3.897%和 3.786%，其他正向因素如燃料结构和全国人口数量对二氧化碳排放的贡献相对较小，都不足 1%；主要的负向影响因素有各部门（除工业）的能源消费强度、各省部门结构比重、各省经济产出比重、我国农村人口比重和工业部门能源消费强度，在 1999-2000 年和 2000-2001 年两个时期的贡献率分别为-1.035%和-0.096%、-0.357%和-0.156%、-0.310%和-0.573%、-2.145%和-2.218%、-8.375%和-3.854%；各省工业化水平由 1999-2000 年的正向影响因素转变为 2000-2001 年的负向影响因素，贡献率 0.724%变为-0.909%。

从各省的分量数据来看，对正向因素中各省经济产出贡献较大的是河北、山西、辽宁、山东、湖北、广东、江苏、河南、安徽等省，贡献率都在 0.4%以上，说明该时期上述省份的经济产出较大，对二氧化碳排放增长起到促进的作用；对人均 GDP 贡献较大的有河北、山西、山东、辽宁、河南、湖北、广东、江苏、浙江等省，贡献率都在 0.4%以上；对城镇化水平贡献较大的省份有河北、山西、辽宁、山东、湖北、广东等，贡献值都在 0.2%以上。而负向因素中只考虑超过 -1%的影响因素，对工业部门能源消费强度影响较大的省份有江苏、湖北、广东、河北、新疆、黑龙江等，贡献值都在-0.2%以上，对我国农村人口比重贡献较大的省份有河北、山西、辽宁、山东、河南、湖北、广东、江苏、安徽、四川等，贡献值都在-0.1%以上。

(3) 2001-2002 年和 2002-2003 年，在这两个时期，二氧化碳排放增速变缓，由前一阶段的 17.147%变为后一阶段的 13.382%，在整个阶段内，主要的正向影

响因素依旧为各省的经济产出、人均 GDP 和城镇化水平,前后两个阶段下降速度较快,分别由 9.569%变为 3.414%、由 8.892%变为 3.095%、由 3.627%变为 0.929%;主要的负向影响因素有工业部门能源消费强度、农村人口比重、燃料结构和各省经济结构比重,在前后两个阶段内贡献率变化悬殊,其中最为悬殊的是各省经济结构比重,由前一阶段的-0.466%转变到后一阶段的-19.062%,另外各部门(除工业)能源消费强度由前一阶段的负向影响因素转变为后一阶段的正向影响因素,贡献率由-0.397%变为 26.009%,变化也较大。通过分量数据分析可知,各省交通部门数据的变动对这两个因素的变化起主要的作用。

从各省的分量数据来看,对正向因素中各省经济产出贡献较大的是北京、河北、山西、辽宁、浙江、江苏、山东、广东、河南、安徽等省,贡献值均从前一阶段的 0.4%以上变化到后一阶段的 0.1%以上;对人均 GDP 贡献较大的有北京、河北、山西、山东、辽宁、河南、湖北、广东、江苏、浙江、安徽等省,贡献值也从前一阶段的 0.3%以上变化到后一阶段的 0.1%以上;对城镇化水平贡献较大的省份有河北、山西、辽宁、山东、河南、湖北、广东等,贡献值也从前一阶段的 0.2%左右变化到后一阶段的 0.1%左右。而负向因素中也只考虑超过-1%的影响因素,对工业部门能源消费强度影响较大的省份有北京、辽宁、上海、安徽、江西、湖北、河北、河南等,贡献值从前一阶段的-0.2%以上变化到后一阶段的-0.1%左右及以下,对我国农村人口比重贡献较大的省份有河北、山西、辽宁、安徽、山东、河南等;对各省部门结构比重悬殊变化影响较大的省份有北京、天津、山西、内蒙古、辽宁、上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东、湖北、广东、四川、云南等。

(4) 2003-2004 年、2004-2005 年、2005-2006 年和 2006-2007 年,在这 4 个阶段,二氧化碳排放增速加快,二氧化碳排放增长速度都在 20%以上,分别为 22.931%、39.607%、26.109%和 24.813%。此阶段的主要正向影响因素与前几个阶段相同,为各省的经济产出、人均 GDP 和城镇化水平,各省的经济产出在 4 个阶段内变化不大,而且由 17.83%上升到 18.353%之后,逐渐下降到 15.197%和 16.942%,而人均 GDP 的变化情况则刚好相反,经历短暂的下降之后逐渐上升,由 15.203%下降到 13.061%,然后上升到 19.411%;主要的负向影响因素有农村人口比重,相邻的 4 个时期一直维持在-2%左右;而各个部门(含工业部门)能源消费强度由 2003-2004 年碳排放增长的负向影响因素变为 2004-2005 年的正向影响因素,之后又变成 2005-2006 年和 2006-2007 年碳排放增长的负向影响因素;各省部门结构比重由 2003-2004 年碳排放增长的正向影响因素变为之后三个阶段的负向影响因素,变化绝对量差距较大;各省经济产出比重也由前两个时期的正向影响因素变为后两个时期的负向影响因素。

从各省的分量数据来看,对正向因素中各省经济产出贡献较大的是河北、山

西、内蒙古、辽宁、吉林、江苏、浙江、山东、广东、河南、湖南、四川、贵州等省，贡献值均在 0.5% 以上；对人均 GDP 贡献较大的有河北、山西、内蒙古、辽宁、江苏、浙江、山东、河南、湖北、湖南、广东、四川等省，贡献值均在 0.5% 以上；对城镇化水平贡献较大的省份有河北、山西、江苏、山东、河南、湖北等，贡献值均在 0.15% 以上；对负向影响因素农村人口比重贡献较大的省份有河北、山西、江苏、山东、河南、湖北、四川等，贡献值均在 -0.1% 以上；对各个部门（含工业部门）能源消费强度影响较大的省份有河北、辽宁、江苏、浙江、福建、山东、河南、湖北、湖南、广西、重庆、云南等，上述省份的变化趋势与各个部门（含工业部门）能源消费强度总量数据的变化趋势相同；对各省部门结构比重影响较大的省份有北京、天津、黑龙江、上海、福建、广东等省，其四个时期的变化趋势与总量数据相同；对各省经济产出比重贡献较大的省份有河北、山西、山东、河南、广东等省，其变化趋势与总量数据相同，因此对其贡献较大。

（5）2007-2008 年和 2008-2009 年，二氧化碳增速大幅减少，增长速度由前几个阶段的 20% 以上减少到 2008-2009 年的 14.7%，如果只考虑值超过 1% 的影响因素，正向的影响因素有各省的经济产出、人均 GDP、城镇化水平和各省经济产出比重；负向的影响因素有各部门（含工业部门）能源消费强度、农村人口比重等。燃料结构由 2007-2008 年的二氧化碳排放增长的负向影响因素变为 2008-2009 年正向影响因素，各省工业化水平则由 2007-2008 年的二氧化碳排放增长的负向影响因素变为 2008-2009 年正向影响因素。

从分量数据来看，对正向因素中各省经济产出贡献较大的是河北、内蒙古、辽宁、江苏、浙江、山东、湖北、湖南、四川等省，贡献值均在 0.5% 以上；对人均 GDP 贡献较大的有河北、山西、内蒙古、辽宁、江苏、山东、河南、湖北、广东、四川等省，贡献值均在 0.3% 以上；对城镇化水平贡献较大的省份有河北、山西、辽宁、江苏、山东、河南、湖北、广东、四川等，贡献值均在 0.1% 以上；对各省经济产出比重贡献较大的省份有内蒙古、辽宁、湖北、湖南、重庆、陕西等，贡献值均在 0.1% 以上；对负向因素中各部门（含工业部门）能源消费强度贡献较大的省份有内蒙古、辽宁、吉林、江苏、浙江、安徽、山东、湖北、湖南、广东、贵州等，贡献值均在 -0.1% 以上；对农村人口比重贡献较大的省份有河北、山西、江苏、浙江、安徽、山东、河南、湖北、广东、四川等，贡献值均在 -0.1% 以上。此阶段，由于受世界金融危机的影响，能源消耗量增速减小，二氧化碳排放量逐渐降低。

（6）2009-2010 年，与上一阶段对比可知，二氧化碳排放增长呈现大幅增长趋势，增长率超过了 20%，达 23.2919%。其中二氧化碳排放增长的正向影响因素有各省经济产出、人均 GDP、城镇化水平、各省的工业化水平和各省经济产出比重，这些因素变化的贡献值分别为 18.43%、16.244%、3.287%、2.386%和

1.705%；负向影响因素有各部门（含工业部门）能源消费强度、我国农村人口比重和各省部门结构比重的变动，其对二氧化碳排放增长的贡献值分别为-15.554%、-3.176%和-0.987%。

从各省的分量数据可以看出，对正向因素中各省经济产出贡献较大的是河北、山西、内蒙古、辽宁、江苏、浙江、安徽、山东、河南、湖北、湖南、广东、陕西、新疆等省，贡献值均在 0.5%以上；对人均 GDP 贡献较大的有河北、山西、内蒙古、辽宁、江苏、浙江、山东、河南、湖北、湖南、广东、四川等省，贡献值均在 0.5%以上；对城镇化水平贡献较大的省份有河北、山西、辽宁、江苏、山东、河南、湖北、广东、四川等，贡献值均在 0.15%以上；对各省工业化水平贡献较大的省份有山西、内蒙古、辽宁、吉林、安徽、江西、湖北、湖南、广西、四川、云南、新疆等，贡献值均在 0.1%以上；对各省经济产出比重贡献较大的省份有山西、辽宁、江苏、安徽、湖北、湖南、四川、陕西、新疆等，贡献值均在 0.1%以上；对负向因素中各部门（含工业部门）能源消费强度贡献较大的省份有河北、山西、内蒙古、江苏、浙江、山东、河南、湖北、湖南、广东、广西、重庆、四川、新疆等，贡献值均在-0.5%以上；对农村人口比重贡献较大的省份有河北、山西、内蒙古、辽宁、江苏、山东、河南、湖北、湖南、广东、四川等，贡献值均在-0.1%以上。

通过对以上各个阶段我国二氧化碳排放增长的分析可知：各个阶段主要的正向和负向影响因素基本相同。在所有的影响因素中，各省的经济产出、人均 GDP 和城镇化水平对二氧化碳排放的增长起到促进作用；而各部门的能源消费强度、农村人口比重、各省部门结构比重等因素对二氧化碳排放的增长起到抑制作用；其他几种影响因素影响的效果相比上述几种因素相对较小，甚至在不同的时期会起到相反的作用。从各省的分量数据可以得出：对主要影响因素贡献较大的省份主要是由东部地区组成，近年来随着中部地区和西部地区经济的不断发展，贡献较大的省份也逐步向中西部地区转移，这符合我国 1997-2010 年间经济发展的基本情况。从部门分量数据可以得出：工业对二氧化碳排放增长起着重要的作用，交通运输、仓储和邮政业和批发、零售业和住宿、餐饮业以及建筑业、生活消费等也起到了一定的作用，农、林、牧、渔、水利业和其他行业对二氧化碳排放增长的影响相对较小。

#### 5.4.2 对影响因素进行分类研究

根据上述影响因素自身的特点以及模型的求解结果，本文将上述对二氧化碳排放增长起作用的影响因素进行分类，主要分为三类：强度效应、结构效应和规模效应。详细分类情况见表 5-6。

表 5-6 二氧化碳排放影响因素分类表

Table 5-6 Classification of factors influencing the carbon dioxide emission

类 别	因素名称	符 号	1997-2010 年贡献值变动情况	平均 贡献率
强度效应	各部门(除工业)能源消费强度	EI	+----+-----	-0.516%
	工业部门能源消费强度	IEI	-----+-----	-5.573%
结构效应	能源(燃料)结构	FS	++++--++++-++	0.214%
	各省部门结构比重	ES	+-----+-----	-0.278%
	各省工业化水平	IES	--+-+++++++-+	0.412%
	各省经济产出比重	GS	+---++++-++++	0.61%
	我国城镇化水平	UR	+	3.091%
	农村人口比重	RP	—	-2.127%
规模效应	全国人口数量	P	+	0.563%
	人均 GDP	PCG	+	10.787%
	各省经济产出	$Y_i$	+	11.961%

从表 5-6 可以清晰地看出：主要的正向影响因素有各省经济产出、人均 GDP、我国城镇化水平和全国人口数量；主要的负向因素有农村人口比重、各部门能源消费强度和经济结构比重；从整个时间周期来看表现出正向的影响因素有各省部门产出比重、各省工业化水平和能源（燃料）结构等因素。下面对各类效应进行分析。

#### （1）能源消费强度效应

能源消费强度是指能源利用或物力产出之比。本文的能源消费强度是指各省分部门能源消耗量与各省分部门的经济产出之比。EI 和 IEI 之和等于各部门的能源消费强度，各部门的能源消费强度对二氧化碳排放增长起到反向的作用。各省所有部门能源消费强度的贡献值如图 5-4 所示，从图中可以明显地看出，各省能源消费强度数据大多年份都在“0 值”线以下，从而更易说明能源消费强度对二氧化碳排放增长起到反方向的作用。而且可以看出在 2003-2004 年广东、上海、山西、山东等省区的能源消费强度值对该年度二氧化碳排放增长起到重要的反向作用。

从各省分部门的数据可以看出，由于各省分部门能源消费强度对二氧化碳排放增长的贡献值各不相同，可以考虑通过降低某几个部门的能源消费强度来实现减排二氧化碳的目的。对比各省分部门的数据可以得出，工业和交通运输业的能源消费强度数据对二氧化碳排放增长贡献的比重相对较大，而且在若干时期这两个部门的数据都是正的，这对二氧化碳排放增长起到促进的作用，所以可针对这些部门通过提高转化和利用效率来降低该部门的能源消费强度，从而达到减少二氧化碳排放的目的。

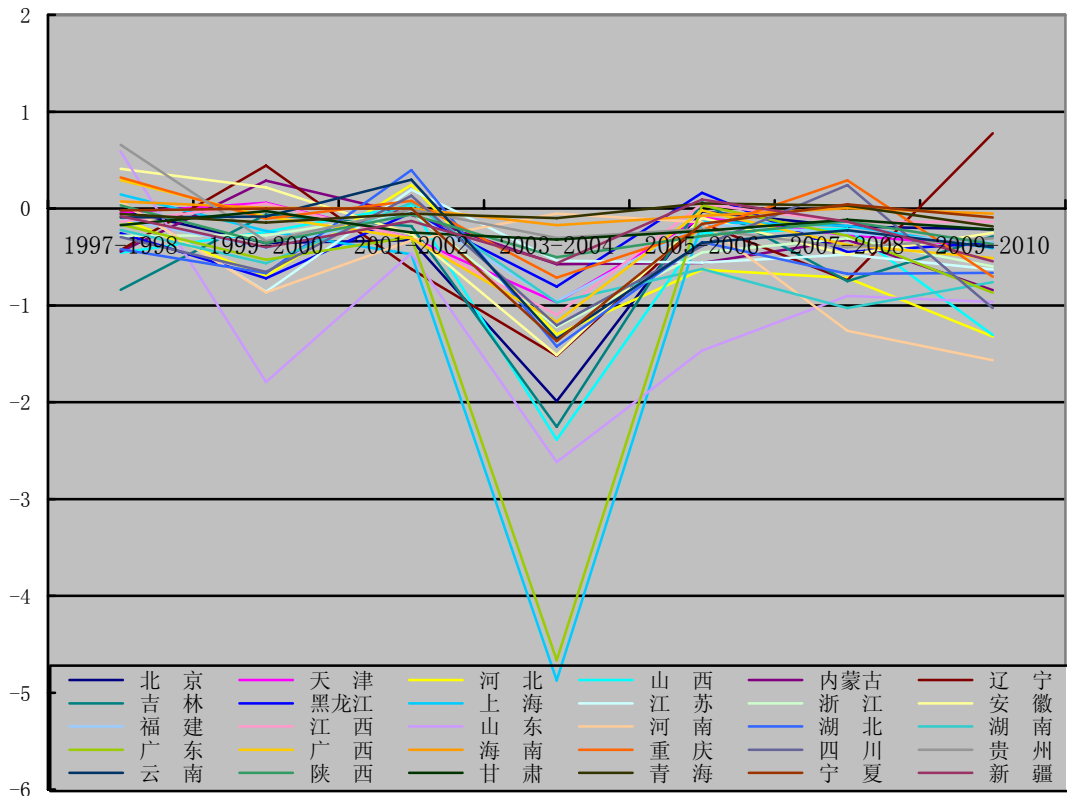


图 5-4 各省能源消费强度对二氧化碳排放的贡献 (%)

Fig.5-4 Contribution of CO<sub>2</sub> emissions of provinces energy consumption intensity (%)

## (2) 结构效应

在结构效应这一类别当中,我国城镇化水平和农村人口比重对二氧化碳排放增长起到的作用是确定的,而 FS、ES、IES 和 GS 对二氧化碳排放增长贡献随年份的变化而变化,而且在不同的年份所起的作用甚至是反向的,下文将对这几个变量进行分析,以便确定整体所做的贡献。

首先对 FS 进行分析,本文的能源结构主要是 8 种燃料的结构比重,由于这 8 种燃料都是化石燃料,都属于高碳能源,所以增加消费量必然会导致二氧化碳排放的增长,但适当调整煤炭、石油和天然气的消费比重,减少煤炭的消费比重,适当增加石油和天然气的消费比重,在提供相同热值的情况下,不但能满足经济发展对能源需求的同时,也可以实现二氧化碳排放量的减少。

其次,ES 和 IES 的加总等于整个经济结构,在本文的分量数据中代表各省分部门经济结构比重对整体二氧化碳排放增长所做出的贡献。由于省级的数据显示这两个指标对二氧化碳排放的贡献变化较快,所以可以考虑绘制类似图 5-4 的折线图来直观的显示它们对二氧化碳排放所做的贡献,详见图 5-5。

从图 5-5 可以看出,各省部门结构比重对二氧化碳排放增长的贡献值大都在“0 值”线以上,这说明各省部门结构比重整体对二氧化碳排放增长起到正向的作用。从图上也可以看出在 2003-2004 年广东、山东、北京、上海等省区的部门





从图 5-6 可以直观地看出, 各省经济产出比重对二氧化碳排放增长的影响相对比较复杂, 在“0 值”线上线下的部分没有太明显的差异, 所以该影响因素对二氧化碳排放的贡献不如其他因素明显, 而且从分量数据中可以看出工业、交通运输业、建筑业等对该指标的贡献值影响较大。

### (3) 规模效应

本文把各省经济产出、人均 GDP 和全国人口数量的变动对二氧化碳排放增长产生的影响统称为规模效应。从 1997 到 2010 年, 逐年之间各省经济产出、人均 GDP 和全国人口数量的变动对二氧化碳增长的平均贡献率分别为 11.9612%、10.7871%和 0.5627%, 其中各省经济产出和人均 GDP 的变动对二氧化碳排放增长贡献较大, 全国人口数量的变动对二氧化碳排放增长影响较小, 这一结果从表 5-5 和 5-6 比较容易看出, 此处不再过多阐述。

## 5.5 本章小结

本章首先对指数分解模型进行分析, 对最常用的两种分解方法 Laspeyres 和 Divisia 分解法进行简单介绍, 然后对两种常用的迪氏分解法 AMDI 和 LMDI 进行对比分析, 结合以往学者的研究成果, 选取 LMDI 分解法作为本章研究的主要模型方法。

根据工业在全国能源消费量中的比重, 本文决定把工业部门单独列出来进行分解, 建立了新的分解模型, 该模型共有 12 个分解指标; 然后以《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》和《中国工业经济统计年鉴》等年鉴的统计数据为基础, 选取 30 个省、7 个部门和 8 种燃料的数据进行分析, 并对模型进行求解计算; 最后对求解结果进行着重分析, 分析了各个时期影响因素变化对二氧化碳排放增长带来的影响, 而且对影响因素进行分类研究。

本章模型得出的结果以及对结果的分析对下一章碳减排目标约束和对策研究做了进一步的铺垫。



## 6 减排目标实现的情景分析

在上一章研究中,本文对二氧化碳排放因素进行指数分解研究,将总排放量分解成 30 个省、7 个部门和 8 种燃料的数据,并从历年的分解数据中得出各个影响因素在某一时期的变动对该时期二氧化碳排放量的贡献值,本章结合前几章的研究成果,将对二氧化碳减排的主要影响因素进行分析,并结合分析的结果以及我国政府承诺的碳强度减排目标进行优化研究,然后针对优化研究得出的结果对二氧化碳减排进行对策研究。

### 6.1 减排影响因素分析

根据上一章表 5-5 和表 5-6 的分析结果,可以得出主要的正向排放因素为各省经济产出、人均 GDP、全国城镇化水平、能源(燃料)结构和全国人口数量,而主要的反向因素有农村人口比重、能源强度以及经济结构比重等。对于二氧化碳减排来说,上述各种影响因素所起的作用刚好相反,所以下文将对上述可量化的二氧化碳减排影响因素逐个分析。

#### 6.1.1 各省经济产出

从上一章的分析可知,各省经济产出的变化对二氧化碳排放的增长影响较大。各省经济发展对二氧化碳排放增长在各个时期贡献不同,东部地区经济发展较快,经济产出的变化对二氧化碳排放增长影响较大,中西部地区随着近年经济的发展,一些发展较快省份经济产出的变动对二氧化碳排放增长的变动越来越大。这些省份经济快速发展的同时,给能源需求和环境增长带来了很大的压力,使得我国二氧化碳减排面临着严峻的形势。

对经济发展与二氧化碳减排关系问题的研究国内外已有很多成果,结论也各不相同,本文在此不一一列举,只探讨二氧化碳减排的成本问题,我国经济发展的同时在二氧化碳减排方面究竟能承受多大的压力?对于目前中国的经济发展而言,经济产出过多依赖国际低端工业制成品市场、能源过多依赖化石能源特别是煤炭资源、产业结构过多依赖高耗能产业、中西部地区的崛起过多依赖当地的资源禀赋优势等等,这些因素都制约着我国在二氧化碳减排框架下经济的稳定增长。若要改变目前的经济发展现状,就需要不断更新技术、加快产业升级、开发新能源替代煤炭等等,这需要支付巨大的成本压力,同样也不是短期内就可以轻松完成的,对当前我国经济所处的发展阶段来说速度还不能过快,不然不利于当前经济的可持续发展。

### 6.1.2 农村人口比重及全国人口数量

从中国能源统计年鉴中人均生活用能量可知, 1980 年, 我国城镇人均生活用能量为 332 千克标准煤, 而农村的人均生活用能量只有 60 千克标准煤, 随着经济社会的发展和人民生活水平的不断提高, 农村人均生活用能量不断增加, 而城镇居民则由于节约意识的提高, 以及节能减排工作的开展, 人均生活用能量出现了波动, 且出现下降的趋势。到 2010 年, 农村人均生活用能量达到 204 千克标准煤, 比 1980 年增长了将近 3 倍多; 城镇人均生活用能量达到 315 千克标准煤, 比 1980 年减少了 5.12%。从人均消费量的对比上可以直观看出, 农村人口比重越大, 能源消费量相对越小。

然而, 目前正是我国城镇化和工业化快速发展的时期, 城镇人口比例不断增大是我国未来一段时间内人口变化的趋势。因此靠增加农村人口比例去减少二氧化碳排放总量的做法就变的不切合实际。

而全国人口数量在近几年以每年净增 700 万左右的速度稳定增长, 全国人口的稳定增长预示着对能源消费需求的稳定增长, 按照 2010 年的人均能源消费量的值计算, 每年增加的能源消费量约 1700 万吨标煤。单从这个角度考虑, 可以考虑降低人口数量的方法降低能源需求。但人口增长并非越少越好, 较低的人口增长率还会带来一系列社会问题, 因此靠减少人口数量的做法带来的二氧化碳减排空间有限。另外, 家庭规模的小型化导致人均消费水平的增加, 在很大程度上抵消了总人口增长减缓对二氧化碳排放带来的影响。

### 6.1.3 能源结构

能源结构包含生产结构和消费结构, 根据我国资源禀赋的特点, 我国能源的生产和消费结构中煤炭都占有绝对的比重, 经济社会的发展过于依赖煤炭。根据各种化石能源的碳排放系数可知, 在提供同等热值的情况下, 同样是化石能源天然气碳排放量要比煤炭少 40%, 而核能和可再生能源在合理的利用方式下基本上不排放二氧化碳。目前我国能源消费中煤炭比重过高, 对煤炭的过度依赖造成我国在经济发展过程中二氧化碳排放量的不断增长, 所带来的碳排放压力也相对较大。

根据我国目前能源资源的探明储量可知, 煤炭在未来较长一段时间内仍是我国的主要能源, 在保障和支撑我国经济发展和能源安全上所做的贡献依然不能被其他能源资源所取代, 而且目前我国化石能源的利用方式相对较粗放, 利用技术有待改进, 利用效率尚需进一步提高。这种高碳的能源结构以及高碳的能源利用特征, 决定了未来较长一段时间内难以彻底改变, 短期内走上低碳经济发展道路还不现实。因此, 下一步要从能源结构调整和能源利用效率等方面去减少二氧化碳排放量。

#### 6.1.4 部门结构（产业结构）

从第五章的模型分析可以很清晰地看出，大多省份在经济发展和二氧化碳排放过程中，工业所做的贡献较大，特别是工业中制造业的快速发展更是导致了二氧化碳排放量的持续增长。

在我国当前的经济结构中，按产业划分，第二产业中的工业在国内生产总值贡献约 40% 左右，而在地区生产总值中，特别是广东、江苏、浙江、河南等产值大省，工业所占的比重都接近一半；按行业划分能源消费量，工业所消费的能源总量占能源消费总量 70% 以上，工业中的制造业所消耗的能源更是占工业能源消费量的 80% 以上，而且其中较大一部分是煤炭资源。高碳的经济结构（产业结构）必然会导致二氧化碳排放量的增加，因此优化产业结构是减排二氧化碳的关键。

#### 6.1.5 能源消费强度

长期以来，我国经济发展的粗放式增长造成了对能源尤其是煤炭资源的过度依赖，单位 GDP 能耗与世界平均水平相比相对较高。虽然转变增长方式的政策已实施多年，但粗放型增长方式还未根本转变，某些省区在经济发展过程中，高投入、高能耗、低效率的现象依然存在。

根据国家统计局资料显示，近年来我国单位 GDP 能耗逐渐降低，由 1997 年的 3.40 吨标准煤/万元下降到 2010 年的 1.03 吨标准煤/万元，下降了 69.7%，与世界发达国家相比能耗水平还有较大差距，所以未来还有很大的提升空间。

对于各个部门来说，能源强度也各不相同。工业特别是制造业是我国主要的用能大户，能源强度与国外发达国家相比有较大的差距，虽然近年来能源的转化和利用效率有很大幅度的提升，但与国外先进水平相比还有很大差距。建筑业和交通运输业也是我国的用能大户，随着工业化和城镇化建设的推进，我国对建材和交通工具的需求不断加大，而这些行业都属于高耗能行业，对能源的依赖程度较大，特别是交通运输业，对石油的依赖程度较大，而我国石油的进口依赖程度又比较大，这不利于能源安全，因此应加快能源转化效率，更新能源利用技术，提高能源利用效率，减少二氧化碳排放。

### 6.2 组合情境下减排目标实现分析

我国政府在哥本哈根世界气候大会之前已经对世界做出了承诺：到 2020 年，我国单位 GDP 二氧化碳排放量比 2005 年降低 40-45%，与此同时，非化石能源占一次能源的消费比重达 15% 左右，并作为约束性指标纳入国民经济的中长期发展规划。

若要实现这些目标，就需要结合上一章研究得出的结论，从对二氧化碳排放

增长起主要作用的分解因素入手进行分析。通过 6.1 节的分析可知，本节主要对能源消费结构、各省 GDP、产业结构或经济结构以及各部门的能源强度等进行研究。

首先，本文对碳强度指标的定义进行界定，碳强度是指单位 GDP 二氧化碳排放量，该指标的大小不代表能源利用效率的高低，但随着经济发展和技术的不断进步，该指标的值会逐渐变小。下面可以用公式去表示碳强度：

$$CI = \frac{C}{GDP} = \frac{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{17} E_{ij} \times K_{ij}}{GDP} \quad (6.1)$$

由于各省（市、县）在计算 GDP 时实行分级核算，分级负责，其计算口径、核算范围、核算方法、核算依据尚不够规范和统一，因而各地相加后，一般不等于全国（省、市）的 GDP，故此处 GDP 数据仍以全国统计数据为准，全国的国内生产总值可以代表国民经济的整体发展趋势。

下文对各种因素在不同情景下的优化调整进行分析。

### 6.2.1 能源消费结构调整优化分析

本节采用灰色系统和马尔科夫链模型相结合的方法对能源消费结构进行分析，先采用灰色系统模型对历年各类能源消费量比重进行预测，然后把预测值和真实值加权平均，对加权平均后的值进行状态分析，确定转移概率矩阵，并采用马尔科夫链模型对这些状态进行分析，估算未来各类能源的消费比重，然后根据非化石能源约束目标对转移概率矩阵进行调节，最后得出在约束目标下各类能源消费比重的预测值。

由于能源消费原始统计数据存在某些缺陷，而灰色系统可以对原始数据进行较好地预测，预测的结果能较好地符合能源消费的变化规律，而将预测后的数值和原始数据进行加权平均，可以得出更符合实际规律的能源消费比重数据序列，用此数据序列进行马尔科夫模型预测，可以减弱单个年份数据变化过大对整体预测造成的影响。

从 1997-2010 年的能源消费结构分析可知，我国煤炭消费量所占比重较大，一直在 70% 左右，高碳能源的比例结构尤其是煤炭消费的高比重必然会导致我国二氧化碳排放量的居高不下。1997-2010 年的能源消费结构详见表 6-1。

可以先对原始消费比例数据进行预测，通过预测值和真实值之间的对比去验证预测模型的准确性和可行性。用灰色系统对 1997-2010 年能源消费比重数据序列进行预测，预测值详见表 6-2。结合灰色模型预测的结果，对原始消费比例数据进行处理，得出历年的消费比例结构见表 6-3。

表 6-1 1997-2010 年能源消费总量及构成

Table 6-1 Total Consumption of Energy and Its Composition

年 份	能源消费总量（万吨标准煤）	占能源消费总量的比重（%）			
		煤 炭	石 油	天然气	水电、核电、风电
1997	135909	71.4	20.4	1.8	6.4
1998	136184	70.9	20.8	1.8	6.5
1999	140569	70.6	21.5	2.0	5.9
2000	145531	69.2	22.2	2.2	6.4
2001	150406	68.3	21.8	2.4	7.5
2002	159431	68.0	22.3	2.4	7.3
2003	183792	69.8	21.2	2.5	6.5
2004	213456	69.5	21.3	2.5	6.7
2005	235997	70.8	19.8	2.6	6.8
2006	258676	71.1	19.3	2.9	6.7
2007	280508	71.1	18.8	3.3	6.8
2008	291448	70.3	18.3	3.7	7.7
2009	306647	70.4	17.9	3.9	7.8
2010	324939	68.0	19.0	4.4	8.6

资料来源：2011 中国能源统计年鉴，其中能源消费比例采用发电煤耗算法。

表 6-2 灰色模型预测结果

Table 6-2 Prediction results of the Grey Model

年 份	占能源消费总量的比重（%）			
	煤 炭	石 油	天然气	水电、核电、风电
1997	71.4000	20.4000	1.8000	6.4000
1998	69.7934	22.3512	1.7616	6.2223
1999	69.8022	21.9931	1.8921	6.3450
2000	69.8110	21.6408	2.0322	6.4701
2001	69.8198	21.2940	2.1828	6.5976
2002	69.8286	20.9529	2.3445	6.7276
2003	69.8374	20.6172	2.5182	6.8602
2004	69.8461	20.2868	2.7048	6.9954
2005	69.8549	19.9618	2.9052	7.1333
2006	69.8637	19.6420	3.1204	7.2739
2007	69.8725	19.3273	3.3516	7.4173
2008	69.8813	19.0176	3.5999	7.5635
2009	69.8901	18.7129	3.8666	7.7126
2010	69.8989	18.4131	4.1530	7.8646

表 6-3 经过整理后的能源消费数据

Table 6-3 The energy consumption data after the consolidation

年 份	占能源消费总量的比重 (%)			
	煤 炭	石 油	天然气	水电、核电、风电
1997	71.40	20.40	1.80	6.40
1998	70.35	21.40	1.80	6.46
1999	70.20	21.75	1.95	6.10
2000	69.51	21.92	2.14	6.44
2001	69.11	21.55	2.29	7.05
2002	68.91	21.70	2.37	7.01
2003	69.86	20.91	2.51	6.72
2004	69.67	20.92	2.56	6.84
2005	70.33	19.88	2.75	7.04
2006	70.53	19.47	3.01	6.99
2007	70.54	19.06	3.33	7.08
2008	70.09	18.63	3.65	7.63
2009	70.15	18.22	3.88	7.76
2010	68.79	18.71	4.28	8.23

注：通过灰色系统预测结果与原始数据加权得出

依据表 6-3 中数据序列可以对未来能源消费比例状态进行预测。对未来的能源消费结构进行预测，最关键的步骤是确定转移概率矩阵  $P$ 。首先，通过表中数据不难发现，能源品种消费比重之间存在相互转移消费比例的可能性，依据此可以求出从 1997-2010 年每相邻年之间能源消费比重的一步转移概率矩阵  $P(i)$  ( $i=1,2,\dots,13$ )，并依据公式 (6.2) 计算平均转移概率矩阵。然后就可以根据 2010 年的能源消费结构和公式 (6.3) 确定未来第  $j$  年的能源消费结构。

$$P = [P(1) \cdot P(2) \cdots P(12) \cdot P(13)]^{1/13} \quad (6.2)$$

$$S(2010+j) = S(2010) \cdot P^j \quad (6.3)$$

由中国统计年鉴的数据显示，四类能源煤炭、石油、天然气和水核风电等其他能源的历年数据显示，它们之间在不同时期存在互相转移的可能性，转移概率矩阵主对角线的元素代表该类能源保留的概率，其余的元素代表能源品种之间相互转化的概率。其中行元素代表该类能源向其他能源转化的概率，列元素代表其他能源转化为该类能源的概率或者是该类能源吸收其他能源的概率。

转移概率矩阵  $P(i)$  ( $i=1,2,\dots,13$ ) 的详细计算方法如下：

(1) 首先计算主对角线元素的值。主对角线上的元素代表某种能源保留的概率。当从  $n$  时刻变化到  $n+1$  时刻时，某类能源的消费比例有所增加，那么该能源的保留概率为 1；而能源消费比例有所减少，那么保留概率就小于 1，具体值可以考虑用  $n+1$  时刻的消费比例除以  $n$  时刻的消费比例，计算方法如公式 (6.4)



和式 (6.5) 所示, 以煤炭为例。

$$S_c(n+1) \geq S_c(n) \Rightarrow P_{c \rightarrow c}(n+1) = 1 \quad (6.4)$$

$$S_c(n+1) \geq S_c(n) \Rightarrow P_{c \rightarrow c}(n+1) = S_c(n+1) / S_c(n) \quad (6.5)$$

(2) 确定主对角线上为 1 的元素所在的行上其他元素的值。当从  $n$  时刻变化到  $n+1$  时刻, 主对角线上的元素值为 1 就说明在变化的过程中, 该类能源的消费比重不会减少, 因此就不可能转移到其他能源上, 因此, 该行的其他元素值都为零。公式如 (6.6) 所示, 以煤炭为例。

$$P_{c \rightarrow c}(n+1) = 1 \Rightarrow P_{c \rightarrow o}(n+1) = P_{c \rightarrow g}(n+1) = P_{c \rightarrow e}(n+1) = 0 \quad (6.6)$$

(3) 确定转移概率矩阵中其他元素的值。以煤炭为例, 计算公式如 (6.7) 所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{c \rightarrow c}(n+1) < 1 \\ P_{c \rightarrow o}(n+1) \neq 0 \\ P_{c \rightarrow g}(n+1) \neq 0 \\ P_{c \rightarrow e}(n+1) \neq 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} P_{c \rightarrow o}(n+1) = \frac{[1 - P_{c \rightarrow c}(n+1)] * [S_o(n+1) - S_o(n)]}{[S_o(n+1) - S_o(n)] + [S_g(n+1) - S_g(n)] + [S_e(n+1) - S_e(n)]} \\ P_{c \rightarrow g}(n+1) = \frac{[1 - P_{c \rightarrow c}(n+1)] * [S_g(n+1) - S_g(n)]}{[S_o(n+1) - S_o(n)] + [S_g(n+1) - S_g(n)] + [S_e(n+1) - S_e(n)]} \\ P_{c \rightarrow e}(n+1) = \frac{[1 - P_{c \rightarrow c}(n+1)] * [S_e(n+1) - S_e(n)]}{[S_o(n+1) - S_o(n)] + [S_g(n+1) - S_g(n)] + [S_e(n+1) - S_e(n)]} \end{array} \right. \quad (6.7)$$

由上面给出的计算公式可知, 运算公式 (6.7) 中状态转移概率矩阵中元素可能存在负值的情况, 这可能与马尔科夫过程中转移概率矩阵的定义不一致, 本文允许存在负值的情况, 但此时的负值只表明转移的方向是反向的, 并不代表概率值是负值。1997-2010 年间的能源消费结构一步转移概率计算结果详见表 6-4。

表 6-4 1997-2010 年我国一次能源消费结构一步转移概率矩阵

Table 6-4 Transition probability matrix of China's primary energy consumption structure from 1997 to 2010

1997-1998 年	煤炭	石油	天然气	其他
煤炭	0.985294	0.013873	0	0.000832
石油	0	1	0	0
天然气	0	0	1	0
其他	0	0	0	1
1998-1999 年	煤炭	石油	天然气	其他
煤炭	0.997868	0.00533	0.002284496	-0.00548
石油	0	1	0	0
天然气	0	0	1	0

续表 6-4

其他	-0.02388	0.055728	0.023883238	0.944272
<b>1999-2000 年</b>	<b>煤炭</b>	<b>石油</b>	<b>天然气</b>	<b>其他</b>
煤炭	0.990171	0.002387	0.002667888	0.004774
石油	0	1	0	0
天然气	0	0	1	0
其他	0	0	0	1
<b>2000-2001 年</b>	<b>煤炭</b>	<b>石油</b>	<b>天然气</b>	<b>其他</b>
煤炭	0.994245	-0.00546	0.002213295	0.009001
石油	-0.01876	0.98312	0.007033151	0.028601
天然气	0	0	1	0
其他	0	0	0	1
<b>2001-2002 年</b>	<b>煤炭</b>	<b>石油</b>	<b>天然气</b>	<b>其他</b>
煤炭	0.997106	0.002285	0.0012185	-0.00061
石油	0	1	0	0
天然气	0	0	1	0
其他	-0.03783	0.028369	0.015130024	0.994326
<b>2002-2003 年</b>	<b>煤炭</b>	<b>石油</b>	<b>天然气</b>	<b>其他</b>
煤炭	1	0	0	0
石油	0.043232	0.963594	0.006370968	-0.0132
天然气	0	0	1	0
其他	0.131003	-0.10894	0.019305754	0.958631
<b>2003-2004 年</b>	<b>煤炭</b>	<b>石油</b>	<b>天然气</b>	<b>其他</b>
煤炭	0.99728	0.000151	0.000755479	0.001813
石油	0	1	0	0
天然气	0	0	1	0
其他	0	0	0	1
<b>2004-2005 年</b>	<b>煤炭</b>	<b>石油</b>	<b>天然气</b>	<b>其他</b>
煤炭	1	0	0	0
石油	0.031248	0.950287	0.008995721	0.009469
天然气	0	0	1	0
其他	0	0	0	1
<b>2005-2006 年</b>	<b>煤炭</b>	<b>石油</b>	<b>天然气</b>	<b>其他</b>
煤炭	1	0	0	0
石油	0.02425	0.950287	0.03152544	-0.00606
天然气	0	0	1	0
其他	0.028409	-0.05824	0.036931818	0.992898
<b>2006-2007 年</b>	<b>煤炭</b>	<b>石油</b>	<b>天然气</b>	<b>其他</b>
煤炭	1	0	0	0
石油	0.000501	0.978942	0.016044219	0.004512
天然气	0	0	1	0

续表 6-4

其他	0	0	0	1
<b>2007-2008 年</b>	<b>煤炭</b>	<b>石油</b>	<b>天然气</b>	<b>其他</b>
煤炭	0.993621	-0.00623	0.004639534	0.007974
石油	-0.02417	0.97744	0.017188827	0.029543
天然气	0	0	1	0
其他	0	0	0	1
<b>2008-2009 年</b>	<b>煤炭</b>	<b>石油</b>	<b>天然气</b>	<b>其他</b>
煤炭	1	0	0	0
石油	0.003144	0.977992	0.012051734	0.006812
天然气	0	0	1	0
其他	0	0	0	1
<b>2009-2010 年</b>	<b>煤炭</b>	<b>石油</b>	<b>天然气</b>	<b>其他</b>
煤炭	0.980613	0.006985	0.005702067	0.0067
石油	0	1	0	0
天然气	0	0	1	0
其他	0	0	0	1

注：一步转移概率矩阵中的负值仅代表此时的转移的方向是反向的

然后按照式（6.2）进行运算，可通过 MATLAB 软件实现运算，最终可以得出平均转移概率矩阵  $P$ 。

$$P = \begin{bmatrix} 0.9951 & 0.0013 & 0.0015 & 0.0020 \\ 0.0050 & 0.9829 & 0.0075 & 0.0047 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.0077 & -0.0063 & 0.0073 & 0.9913 \end{bmatrix}$$

从平均转移概率矩阵可以看出，我国一次能源消费结构中，各能源品种之间的相互转移的概率与现实之间有密切的关系。

首先，从转移概率矩阵中可以看出，对角线元素都相对较大，而且天然气的概率为 1，这说明目前我国的一次能源消费结构相对稳定，在当前的消费结构中，如没有重大技术突破，消费者选择当前的能源消费模式概率较大。近年来天然气的消费比例不断加大，因此保留概率为 1；煤炭是我国最主要的一次能源，短期内还难以被其他能源品种取代，故保留概率值较大；非化石能源特别是核能最近几年发展较快，但规模上还相对较小，若要实现我国对外承诺的碳排放指标，还需要加大投入力度，因此该部分的消费比例会继续加大，保留概率值就会相对较大；石油的保留概率值最小，这是因为我国的预测储量和探明储量相对较低，石油的消费对外依赖度较大，不利于国家的能源安全，所以保留概率值就相对较小。

然后，从每行的元素值可以看出，能源品种之间的转化存在一定的规律性。第一行元素中，煤炭到石油、天然气和其他能源的转移概率分别为 0.0013、0.0015 和 0.002，从数值上面可以看出，煤炭转移到非化石能源的概率较大，转移到天

然气的概率次之，转移到石油的概率最小，这正符合未来我国能源的发展战略；第二行元素中，石油转移到天然气、煤炭和非化石能源的概率值分别为 0.0075、0.0050 和 0.0047，石油消费比例逐渐减少，转移到天然气的概率最大，然后是煤炭，这符合我国当前的基本国情；第三行元素中，只有天然气的保留概率值，这说明未来天然气比例的增加是我国能源发展的趋势；第四行元素中，非化石能源的转移概率中，煤炭占据比例最大，这说明煤炭对于我国能源安全的重要性，当非化石能源出现类似于日本核辐射之类的危机事件时，煤炭能确保非化石能源暂时短缺带来的危机，从而保障了我国的能源安全。

最后，从转移概率矩阵中可以看出，存在一个负值，即非化石能源转移到石油的概率值为负值，本文转移概率矩阵中出现的负值只说明方向是反向，在此只说明石油转移到非化石能源的概率值为正，这与未来石油消费比例的减少一部分转移到非化石能源的趋势相符。

依据此转移概率矩阵，再结合 2010 年的一次能源消费结构比重，按照公式（6.3）可以通过马尔科夫链模型预测出 2015 年和 2020 年我国一次能源消费结构比例，预测结果详见表 6-5。

从表 6-5 可以看出，到 2015 年，我国一次能源消费结构中，煤炭和石油占比有所下降，天然气和非化石能源所占份额不断上升，其中非化石能源所占比重达到 8.9698%；到 2020 年非化石能源的比重进一步提升，达到 9.64%左右，这与我国政府的约束指标“非化石能源占一次能源的消费比重达 15%左右”不相符，因此要进一步进行调整。

表 6-5 我国一次能源消费结构预测结果

Table 6-5 Prediction results of China's primary energy consumption structure

年份	煤炭	石油	天然气	其他
2015 年一次能源消费结构预测比例 (%)	67.8957	17.3340	5.7854	8.9698
2020 年一次能源消费结构预测比例 (%)	67.0171	16.0445	7.2597	9.6382

然后对转移概率矩阵  $P$  做进一步调整，首先考虑非化石能源的比重，与约束条件相差 5 个百分点，而且由能源的发展趋势可知，非化石能源的比重在 2020 年前会一直保持增长的态势，因此转移概率的第四行应该除主对角线元素外其余都为 0。然后考虑第一行和第二行元素的元素，即煤炭和石油转移到其他能源品种的概率，因为未来煤炭和石油的比重呈下降趋势，下降的部分转化为天然气和非化石能源，因此第一行煤炭转为石油的概率和第二行石油转化为煤炭的概率应该调整为零。然后煤炭和石油转化为天然气和非化石能源的份额中，非化石能源的增长速度相对较快。根据这些分析对概率转移矩阵进行调整。

由公式（6.3）可知，可设调整后的状态转移概率矩阵为  $P'$ ，调整后的 2020 年的能源结构向量为  $S'$ ，故有下面公式（6.8）成立。

$$S'(2020) = S(2010) * (P')^{10} \quad (6.8)$$

根据非化石能源的约束指标和表 6-5 预测结果的对比分析, 结合转移概率矩阵  $P$  和公式 (6.8), 可以得出调整后的转移概率矩阵  $P'$  为:

$$P' = \begin{bmatrix} 0.9910 & 0 & 0.0039 & 0.0051 \\ 0 & 0.9723 & 0.0094 & 0.0183 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

通过转移概率矩阵  $P'$  对 2011 年到 2020 年的能源消费结构进行预测, 参照公式 (6.3), 具体预测结果详见表 6-6。

表 6-6 2011-2020 年我国一次能源结构预测结果

Table 6-6 Prediction results of China's primary energy consumption structure from 2011 to 2020

年 份	一次能源消费结构比例 (%)			
	煤 炭	石 油	天 然 气	其 他
2011	67.3880	18.4737	4.8438	9.2945
2012	66.7815	17.9620	5.2803	9.9762
2013	66.1805	17.4644	5.7096	10.6455
2014	65.5849	16.9807	6.1318	11.3027
2015	64.9946	16.5103	6.5472	11.9479
2016	64.4096	16.0530	6.9559	12.5815
2017	63.8299	15.6083	7.3580	13.2038
2018	63.2555	15.1759	7.7537	13.8149
2019	62.6862	14.7556	8.1430	14.4152
2020	62.1220	14.3468	8.5262	15.0050

由表中 2020 年的一次能源结构比例可以看出, 非化石能源所占比重达到 15% 的目标, 所以经过能源结构调整基本上达到我国政府对外承诺的非化石能源在一次能源中的比重。可将调整前后的预测结果进行对比分析, 结果发现两次预测结果相对一致, 煤炭和石油的比例不断下降, 下降的部分要靠增加非化石能源和天然气的份额来补充, 因此, 未来能源结构的调整, 须依赖水电、核电、风电、太阳能等非化石能源的快速发展, 唯此才能从根本上减少碳排放。

### 6.2.2 产业结构调整分析

产业结构是指各产业的构成及各产业之间的联系和比例关系, 亦称国民经济的部门结构。按照国际上通行的分类方法, 主要分为三大产业。其中第一产业是农林牧渔业, 第二产业是工业和建筑业, 第三产业是除了第一和第二行业之外的其他行业。

由《中国统计年鉴》数据显示, 改革开放以来, 我国三次产业结构发生了较

为显著的变化,1991 年以来,第二产业高速发展,第二产业中的工业在国民经济产值中占据较大的份额,这说明工业对拉动国民经济的发展起到至关重要的作用,三大产业在国民经济中的比重详见表 6-7。

表 6-7 1991-2010 年国内生产总值构成  
Table 6-7 Composition of Gross Domestic Product of 1991-2010

年 份	国内生产总值构成 (%)			
	第一产业	第二产业		第三产业
		工 业	建筑业	
1991	24.5	37.1	4.7	33.7
1992	21.8	38.2	5.3	34.8
1993	19.7	40.2	6.4	33.7
1994	19.8	40.4	6.2	33.6
1995	19.9	41.0	6.1	32.9
1996	19.7	41.4	6.2	32.8
1997	18.3	41.7	5.9	34.2
1998	17.6	40.3	5.9	36.2
1999	16.5	40.0	5.8	37.7
2000	15.1	40.4	5.6	39.0
2001	14.4	39.7	5.4	40.5
2002	13.7	39.4	5.4	41.5
2003	12.8	40.5	5.5	41.2
2004	13.4	40.8	5.4	40.4
2005	12.1	41.8	5.6	40.5
2006	11.1	42.2	5.7	40.9
2007	10.8	41.6	5.8	41.9
2008	10.7	41.5	6.0	41.8
2009	10.3	39.7	6.6	43.4
2010	10.1	40.1	6.7	43.1

数据来源: 中国统计年鉴 2011

从表中数据可以看出,第一产业农林牧渔业在国民经济中所占的比重由 1991 年的 24.5%逐渐降低,到 2010 年第一产业的占比只有 10.1%,减少了 14.4 个百分点;第二产业在国民生产总值中所占比重由 1991 年的 41.8%增长到了 2010 年的 46.8%,第二产业中工业一直保持在 40%左右,而建筑业保持稳定增长的态势;第三产业在 20 年间增长了近 10 个百分点,增长速度较快。

通过前面章节分析可知,第二产业尤其是工业对我国二氧化碳排放增长贡献较大,工业的快速增长,特别是重工业的发展造成了化石能源的大量消耗,在某种程度上也加速了我国二氧化碳排放的增长。从历年《中国能源统计年鉴》数据

可以看出,工业分行业终端能源消费量逐年增长,从2002年起进入快速稳定增长阶段,其中制造业增长最为显著,1997-2010年工业分行业终端能源消费量详见附表1。

然后可以考虑采用6.2.1节中马尔科夫转移概率矩阵的方法对我国产业结构进行分析,依据各次产业结构比重的变化,不妨假设三次产业之间存在转移,转移的概率依然按照式(6.7)进行计算,1997-2010年一步转移概率详见表6-8。

表 6-8 1997-2010 年我国三次产业结构一步转移概率矩阵

Table 6-8 Transition probability matrix of China's three industrial structure from 1997 to 2010

1991-1992	第一产业	第二产业	第三产业	2001-2002	第一产业	第二产业	第三产业
第一产业	0.888430	0.067766	0.043805	第一产业	0.95491	-0.01583	0.06092
第二产业	0	1	0	第二产业	-0.01044	0.99416	0.01627
第三产业	0	0	1	第三产业	0	0	1
1992-1993	第一产业	第二产业	第三产业	2002-2003	第一产业	第二产业	第三产业
第一产业	0.904475	0.142671	-0.04715	第一产业	0.93121	0.08580	-0.01701
第二产业	0	1	0	第二产业	0	1	0
第三产业	-0.05931	0.089015	0.9703	第三产业	-0.0228	0.02844	0.99436
1993-1994	第一产业	第二产业	第三产业	2003-2004	第一产业	第二产业	第三产业
第一产业	1	0	0	第一产业	1	0	0
第二产业	0	1	0	第二产业	0	1	0
第三产业	0.00448	0.000079	0.995441	第三产业	0.01445	0.00622	0.97933
1994-1995	第一产业	第二产业	第三产业	2004-2005	第一产业	第二产业	第三产业
第一产业	1	0	0	第一产业	0.90517	0.08519	0.00964
第二产业	0	1	0	第二产业	0	1	0
第三产业	0.00301	0.018044	0.978946	第三产业	0	0	1
1995-1996	第一产业	第二产业	第三产业	2005-2006	第一产业	第二产业	第三产业
第一产业	0.991377	0.011494	-0.00287	第一产业	0.91672	0.048366	0.034911
第二产业	0	1	0	第二产业	0	1	0
第三产业	-0.00247	0.00522	0.99725	第三产业	0	0	1
1996-1997	第一产业	第二产业	第三产业	2006-2007	第一产业	第二产业	第三产业
第一产业	0.928703	0.000121	0.071176	第一产业	0.96907	-0.05743	0.088365
第二产业	0	1	0	第二产业	-0.00729	0.98708	0.02021
第三产业	0	0	1	第三产业	0	0	1
1997-1998	第一产业	第二产业	第三产业	2007-2008	第一产业	第二产业	第三产业

续表 6-8

第一产业	0.96002	-0.07255	0.112534	第一产业	0.99646	0.005324	-0.00178
第二产业	-0.01538	0.97209	0.04329	第二产业	0	1	0
第三产业	0	0	1	第三产业	-0.00037	0.002033	0.99834
1998-1999	第一产业	第二产业	第三产业	2008-2009	第一产业	第二产业	第三产业
第一产业	0.93816	-0.02856	0.09040	第一产业	0.96287	-0.11228	0.14940
第二产业	-0.03011	0.99015	0.03996	第二产业	-0.00838	0.97466	0.033721
第三产业	0	0	1	第三产业	0	0	1
1999-2000	第一产业	第二产业	第三产业	2009-2010	第一产业	第二产业	第三产业
第一产业	0.91456	0.00904	0.0764	第一产业	0.97773	0.07074	-0.04847
第二产业	0	1	0	第二产业	0	1	0
第三产业	0	0	1	第三产业	-0.00819	0.014713	0.99348
2000-2001	第一产业	第二产业	第三产业				
第一产业	0.95543	-0.06738	0.11195				
第二产业	-0.01653	0.98119	0.03535				
第三产业	0	0	1				

注：一步转移概率矩阵中的负值仅代表转移的方向是反向的

通过 MATLAB 软件运行程序可求出平均转移概率矩阵 P

$$P = \begin{bmatrix} 0.9519 & 0.0105 & 0.0376 \\ -0.0046 & 0.9944 & 0.0102 \\ -0.0035 & 0.0089 & 0.9946 \end{bmatrix}$$

从转移概率矩阵中主对角线元素可以看出，第三产业的保留概率值最大，这说明加快第三产业的发展是未来我国产业结构调整的方向；第二产业的保留概率值仅次于第三产业，这说明第二产业对经济发展的贡献较大，在短时期内对国民经济增长的贡献依旧较大；第一产业的保留概率值最低，农林牧渔业对国民生产总值的贡献值相对较小，在第二、三产业快速发展的同时，其所占的比重会逐渐减小。

采用此转移概率矩阵 P 以及公式（6.3）可以对未来十年的产业结构进行预测，详细的预测结构见表 6-9。



表 6-9 我国三次产业结构的预测结果  
Table 6-9 Prediction results of China's three industrial structures

年 份	国内生产总值构成 (%)		
	第一产业	第二产业	第三产业
2011	9.2481	47.0276	43.7244
2012	8.4339	47.2505	44.3157
2013	7.6557	47.4688	44.8754
2014	6.9121	47.6828	45.4052
2015	6.2013	47.8924	45.9062
2016	5.5221	48.0979	46.3800
2017	4.8729	48.2993	46.8278
2018	4.2524	48.4968	47.2508
2019	3.6594	48.6904	47.6502
2020	3.0927	48.8802	48.0271

从上面表中 2011-2020 年的预测结果可以看出,未来十年内第三产业将快速发展,在国民经济中所占的比重不断上升,第二产业增长缓慢,而第一产业则出现下降的趋势。这是未来我国产业结构的大趋势,而且通过对预测结果的分析可以得出:

(1) 从表中数据可以看出,第一产业的结构比重在 2011-2020 年间会继续保持下降的趋势,从 2010 年实际数据 10.1%一直降到 2020 年的预测数据 3.09%,减少了 7.01 个百分点,这不符合实际的情况,第一产业在国民生产总值中占据的份额会变的越来越小,并稳定在一个范围内,但变化率不可能这么快,会经历一个阶段,因此需要对此进行调整,此处的预测仅代表发展趋势;

(2) 第二产业的结构比重会从 2011 年的 47.0276%缓慢上升到 2020 年的 48.8802%,然后将保持下降的态势;

(3) 第三产业的结构比重会逐渐上升,从 2010 年的 43.1%增长到 2020 年的 48.0271%,一直保持增长的态势。

从目前经济发展的形势可以看出,第二产业特别是工业依旧是支撑我国经济飞速发展的重要部门,短时期内可能还会继续增长,然后再缓慢减少,不会出现大幅度的减少;考虑到低碳社会以及节能减排需求,第三产业是我国未来要大力发展的产业,大力发展第三产业可以减少二氧化碳的排放量,可以减缓我国未来经济发展所面临的节能减排压力,但是第三产业的发展也需要经过一个相对较长的过程。这就说明预测结果中的存在一定的误差,所以需要对平均转移概率矩阵进行调整。

但究竟怎么样的结构才是合理的?这要结合我国的节能减排以及承诺的碳排放目标去具体分析,下面对不同组合情景下碳强度目标进行分析,并结合能源消费结构和产业结构进行优化研究。

### 6.2.3 不同组合情景下碳强度目标分析

由于我国政府承诺的碳排放目标是和 2005 年进行对比，所以可根据本文的核算方法首先计算出 2005 年的碳强度数据，然后对未来的指标进行预测，并在不同 GDP 增长情景下对碳强度减排目标进行分析，分析减排目标的可行性。

根据本文第三章中的对二氧化碳排放量的计算以及公式（6.1）计算可以得出 2005 年的碳强度为 0.3135 千克/元。按照我国政府承诺的到 2020 年碳强度下降 40%~45%，即碳强度目标控制在 0.1724~0.1881 千克/元，详见表 6-10。

从表中的数据可以得知，近年来我国的碳强度在不断降低，但到 2020 年，我国若要达到承诺的碳排放目标，碳强度必须控制在 0.1724~0.1881 千克/元内。根据公式（6.1）所示，若要实现碳强度约束目标，要么加快经济增长速度，要么减少二氧化碳排放总量。但目前我国经济发展仍依赖粗放型增长，依赖重工业的快速发展和能源的大量投入，这势必会导致两者之间存在矛盾。若要从根本上解决这对矛盾，必须对能源消费结构和产业结构进行调整，只有这样才能从根本上减少二氧化碳排放，实现碳强度约束目标。

表 6-10 我国碳强度约束目标

Table 6-10 the goal of China's carbon intensity constraint

碳强度	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2020 年	
						40%	45%
实际值（千克/元）	0.313497	0.304965	0.289678	0.274526	0.264474	-	-
约束值（千克/元）	-	-	-	-	-	0.1881	0.1724

注：本表中的实际值是指根据实际统计数据并采用本文提出的计算方法得出的，此处的 GDP 采用不变价的数据，都以 2005 年为基年。

下面结合 GDP 的增长速度以及能源消费结构和产业结构的调整对碳强度约束目标进行分析。对 GDP 的增长可以设定高、中、低三种情景，而对能源结构和产业结构的调整同样可以设定三种情景，组合情景如表 6-11 所示。

表 6-11 不同组合情景下的碳强度分析

Table 6-11 Analysis of the carbon intensity in different combination of circumstances

组合情景		经济增长情景		
		高 速	中 速	低 速
能源消费结构调整情景	大 调	大调高速	大调中速	大调低速
	中 调	中调高速	中调中速	中调低速
	微 调	微调高速	微调中速	微调低速
产业结构调整情景	大 调	大调高速	大调中速	大调低速
	中 调	中调高速	中调中速	中调低速
	微 调	微调高速	微调中速	微调低速

(1) 首先, 考虑不同经济增长情景下国民生产总值的变化;

通过对我国历年国民生产总值以及增长速度的分析可知, GDP 的增长速度是呈现递减趋势的, 借鉴国内外学者对经济增长速度的研究, 以及我国的基本国情, 不妨假定 2010-2015 年间经济高速增长情景下, GDP 增长速度为 8%; 而中速和低速情况下增长速度分别为 7.5%和 7%, 而 2015-2020 年间经济增长的高、中和低速分别为 7%、6.5%和 6%。以 2005 年为基年进行不变价调整和估算, 详细的预测结果见表 6-12。

表 6-12 2011-2020 年不同 GDP 增速下的预测结果

Table 6-7 Prediction results of different GDP growth speed from 2011 to 2020

年 份	经济增长情景			年 份	经济增长情景		
	高 速	中 速	低 速		高 速	中 速	低 速
2011 年	332242.93	330704.77	329166.61	2016 年	483653.74	470353.00	457358.49
2012 年	358822.36	355507.63	352208.27	2017 年	517509.50	500925.95	484800.00
2013 年	387528.15	382170.70	376862.85	2018 年	553735.16	533486.14	513888.00
2014 年	418530.41	410833.50	403243.25	2019 年	592496.63	568162.73	544721.28
2015 年	452012.84	441646.01	431470.27	2020 年	633971.39	605093.31	577404.56

注: 采用不变价的历年国内生产总值进行预测

(2) 第二, 考虑不同 GDP 增速情景下能源消费结构的调整;

6.2.1 节给出了 2020 年在约束情况下能源消费结构的预测值, 从预测值可以看出煤炭在能源消费结构中仍然占据绝对的比重。煤炭的大量消耗势必会导致二氧化碳排放的增多, 参考 6.2.1 节的预测方法和预测值, 在此可分三种情景下对能源消费结构进行调整。由于化石能源的燃烧是产生二氧化碳的根源, 而水、核、风电等能源的利用过程中基本上不产生二氧化碳, 所以此处只考虑三种化石能源的消费结构, 详见表 6-13。

从表 6-13 中的分析可知在能源结构调整三种情景下, 对能源结构进行中调或者大调都能达到非化石能源在一次能源消费结构中的目标。在中调的情景下, 煤炭的消费量由 2010 年的 68%下降到 2020 年的 62.12%, 天然气的数据增长到 2020 年的 8.53%, 此时非化石能源的消费比重占 15%; 而在大调的情景下, 煤炭的消费比例 2020 年降到了 61%, 比 2010 年减少 7 个百分点, 天然气的消费量增长较快, 由 2010 年的 4.4%增长到了 2020 年的 9.61%, 增长了 2.18 倍, 此时非化石能源的消费比例达到了 15.04%。在两种情景下, 煤炭的比例依旧没有大规模减少, 由于此结构调整依赖过去状态所得出的转移概率矩阵, 所以调整的结果具有一定的现实意义。

根据同样的方法可以得出化石能源中各个能源品种在未来十年的消费量数据, 并据此估算在能源结构调整下的碳强度数据。

表 6-13 2011 年-2020 年不同情景下能源结构调整的预测值

Table 6-13 Prediction value of energy structure adjustment in different combination of circumstances from 2011 to 2020

年份	能源结构调整（大调）%				能源结构调整（中调）%				能源结构调整（微调）%			
	煤炭	石油	天然气	其他	煤炭	石油	天然气	其他	煤炭	石油	天然气	其他
2011	67.27	18.47	4.96	9.30	67.39	18.47	4.84	9.30	67.67	18.53	4.55	9.25
2012	66.54	17.96	5.51	9.99	66.78	17.96	5.28	9.98	67.34	18.07	4.69	9.90
2013	65.82	17.46	6.05	10.67	66.18	17.46	5.71	10.65	67.01	17.62	4.83	10.54
2014	65.11	16.98	6.58	11.33	65.58	16.98	6.13	11.31	66.68	17.18	4.96	11.18
2015	64.41	16.51	7.10	11.98	64.99	16.51	6.55	11.95	66.35	16.76	5.10	11.79
2016	63.71	16.05	7.62	12.61	64.41	16.05	6.96	12.58	66.03	16.34	5.23	12.40
2017	63.02	15.61	8.13	13.24	63.83	15.61	7.36	13.20	65.70	15.94	5.36	13.00
2018	62.34	15.18	8.63	13.85	63.26	15.18	7.75	13.81	65.38	15.54	5.49	13.59
2019	61.67	14.76	9.12	14.45	62.69	14.76	8.14	14.41	65.06	15.16	5.61	14.17
2020	61.00	14.35	9.61	15.04	62.12	14.35	8.53	15.00	64.74	14.78	5.73	14.75

（3）最后，考虑不同情景下产业结构的调整。

在我国目前的产业结构中，第二产业占有较大的比重，特别是第二产业中的工业是拉动我国经济飞速发展的主要因素。其中超过 70%左右的二氧化碳排放与工业有着直接的关系，所以产业结构的调整对二氧化碳的减排起着非常重要的作用。

我国正处在工业化快速发展阶段，第二产业的比重在此阶段呈现快速上涨的趋势，此时为满足社会需求而提供最终产品的工业部门逐步居于主导地位，这导致了化石能源的大量消耗，从而引起了二氧化碳排放量的逐渐增多。然而，进入工业化的中后期阶段，工业部门的比重增长缓慢，开始出现下降的趋势，而此时第三产业则会快速增长，产业结构的变化与工业化阶段之间存在着高度的相关性。因此若要从根本上减少二氧化碳的排放，需要对未来的产业结构进行调整。

参照 6.2.2 节对产业结构调整的方法，并结合我国当前产业结构的现状，可以对产业结构进行大调、中调和微调三种情景下的调整。

调整的结果详见表 6-14。

从表 6-14 中数据可以看出，如果按照我国产业结构的发展趋势，依据平均转移概率矩阵对未来能源结构进行调整，即在微调的情景下，到 2020 年我国第二产业和第三产业的比重基本持平，第二产业略高于第三产业，第一产业比重降低过快；在产业结构中调情景下，第一产业依旧保持下降的趋势，第二产业比重保持缓慢下降的态势，第三产业一直保持上升态势，到 2020 年第三产业比第二产业高约 5 个百分点；在产业结构大调情景下，第一产业比重不断下降，和中调情景下相比比重有所降低，第二产业一直保持下降的态势，第三产业比重快速上

升,到2020年第三产业比第二产业高约15个百分点。从这些分析可以看出,三次产业结构未来发展的趋势是:第一产业结构比重不断降低;第二产业结构比重缓慢增长后出现回落;第三产业结构快速增长。再结合能源的消费量数据进行分情景预测,并求出相应的各个产业能源需求量预测值,并估算出二氧化碳排放量。

表 6-14 2011 年-2020 年不同情景下产业结构调整的预测值

Table 6-14 Prediction value of industrial structure adjustment in different combination of circumstances from 2011 to 2020

年份	产业结构调整(大调)%			产业结构调整(中调)%			产业结构调整(微调)%		
	第一产业	第二产业	第三产业	第一产业	第二产业	第三产业	第一产业	第二产业	第三产业
2011	9.6142	45.8952	44.4906	9.6344	46.4885	43.8771	9.2481	47.0276	43.7244
2012	9.1517	45.0048	45.8435	9.1902	46.1901	44.6196	8.4339	47.2505	44.3157
2013	8.7115	44.1288	47.1597	8.7666	45.9044	45.3290	7.6557	47.4688	44.8754
2014	8.2925	43.2671	48.4404	8.3624	45.6308	46.0068	6.9121	47.6828	45.4052
2015	7.8937	42.4196	49.6868	7.9769	45.3687	46.6544	6.2013	47.8924	45.9062
2016	7.5140	41.5862	50.8998	7.6092	45.1176	47.2732	5.5221	48.0979	46.3800
2017	7.1525	40.7668	52.0806	7.2584	44.8772	47.8644	4.8729	48.2993	46.8278
2018	6.8085	39.9614	53.2301	6.9238	44.6469	48.4293	4.2524	48.4968	47.2508
2019	6.4810	39.1697	54.3493	6.6046	44.4263	48.9691	3.6594	48.6904	47.6502
2020	6.1693	38.3917	55.4390	6.3001	44.2150	49.4848	3.0927	48.8802	48.0271

根据以上的研究,并参照表 6-11 中的组合,本文给出了在不同情景下 2020 年碳强度的预测数据,详见表 6-15。

表 6-15 2020 年不同组合情景下的碳强度 单位: 千克/元

Table 6-15 Carbon intensity in different combination of circumstances in 2020

组合情景		经济增长情景		
		高 速	中 速	低 速
能源消费结构调整情景	大 调	0.201629	0.211252	0.221382
	中 调	0.207347	0.217242	0.22766
	微 调	0.211938	0.222053	0.232701
产业结构调整情景	大 调	0.190407	0.200449	0.21102
	中 调	0.203206	0.213381	0.224093
	微 调	0.216241	0.220561	0.227426

从表 6-15 可以得出:从每行的数据来看,在同一能源消费结构或产业结构调整的情景下,经济高速增长下所得到的碳强度预测值依次低于中速和低速情景下的碳强度值;从每列的数据看,在同一经济增长情景下,能源消费结构和产业结构在不同调整情景下实现的碳强度分别是不同的,其中在“大调”情景下,碳强度的值要依次低于“中调”和“微调”情景下的值。上述表中结果的得出是显而易见的。

在上述 18 种组合情景下，产业结构大调和经济高速发展的组合情景下所实现的碳强度最低，但仍未达到我国碳强度承诺的目标。这与 2005 年的碳强度相比，碳强度下降了 39.2%，与下降 40% 比较接近。也即在本文设定的任何一种情景下，我国的碳强度目标都不可能实现。但这并不意味着我国的碳强度目标无法实现，因为我国政府做出承诺的碳强度目标是到 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放量与 2005 年相比降低 40%-45%，而我国政府提出的碳强度目标未说明国内生产总值是名义 GDP 还是实际 GDP？上文给出的 GDP 都是以 2005 年为基年的不变价 GDP，如果考虑通货膨胀等因素 GDP 数据要相对较大，若采用名义 GDP，那么就很有可能实现 2020 年的碳强度目标值。而且未来我国会加快第三产业的发展，加大第三产业在国民经济中的比重，从二氧化碳排放角度考虑，产业结构的优化调整可能会比能源消费结构调整更为有效。另外，由碳强度的求解公式可知通过减少碳排放量来减少碳强度的值，本文只考虑各类化石能源的燃烧所排放的二氧化碳，综合考虑了诸多可量化的因素，但还存在一些不可量化的因素，但不在本文的讨论范围之内，比如森林碳汇、技术进步、政策法规和居民消费模式等因素，所以求出的二氧化碳排放量是个估算值，估算值与实际值相比还存在一定的差距，因此从这方面考虑，碳强度目标存在实现的可能性。

### 6.3 减排对策研究

通过上面对碳排放的分析和减排目标优化研究可知，我国政府提出的二氧化碳减排目标实现起来具有一定的难度，但还存在现实的可行性。根据我国目前存在的问题，主要是化石能源消费量过高，煤炭在一次能源生产和消费中所占的比重过大，由此带来我国在经济发展的过程中碳强度目标过高，碳排放压力加大。进一步对深层次的原因进行分析可以发现：我国资源禀赋的特点决定了我国能源利用的高碳结构短期内还难以从根本上改变；我国的工业化和城市化的进程不断加快，造成了经济增长过度依赖于重工业，由此产生的高能耗问题也无法在短期内发生转变；经济粗放型增长，能源利用效率相对较低下，而且我国目前的能源开采、生产、加工和转换以及终端利用技术与世界先进水平相比还存在较大的差距；再加上我国相关法制法规的不健全，导致了我国二氧化碳排放量近年来迅速增长，伴随着国际社会对环境变化的日益重视，我国面临的减排压力也在不断增大。

针对上述存在的问题，结合上文对二氧化碳排放做出的分析，本文尝试对二氧化碳减排的对策进行研究。对我国二氧化碳减排采取的对策要视实际情况而定，区分对待。可具体分为宏观的共性对策和有差异的对策。宏观方面的对策有能源结构和经济结构的调整、能源价格的调整以及政府的其他宏观调控政策。主

要相关的法律法规详见表 6-16。

表 6-16 我国近年来发布实施的节能减排法律法规

Table 6-16 Laws and regulations of energy saving and emission reduction published and implemented in recent years in China

年 份	相关领域	政策和措施
2005 年	高耗能产品	《关于控制部分高耗能、高污染、资源性产品出口有关措施的通知》
2006 年	节能工程	《关于印发“十一五”十大重点节能工程实施意见的通知》
2006 年	节能减排	国务院发布《关于加强节能工作的决定》
2006 年	节能减排	国务院关于加强节能工作的决定
2007 年	节能减排	修订通过节约能源法
2007 年	节能减排	节能减排综合性工作方案 节能减排统计监测及考核实施方案和办法的通知
2007 年	煤炭	煤炭产业政策 煤炭工业“十一五”发展规划
2007 年	可再生能源	可再生能源中长期发展规划
2007 年	节能减排考核	单位 GDP 能耗考核体系实施方案
2007 年	能源	《能源发展“十一五”规划》
2007 年	节能减排	《节能减排统计监测及考核实施方案和办法》
2008 年	可再生能源	《可再生能源发展“十一五”规划》
2008 年	石油电力	《关于进一步加强节油节电工作的通知》
2008 年	民用建筑 公共机构	《民用建筑节能条例》 《公共机构节能条例》
2008 年	交通运输	《公路、水路交通实施〈中华人民共和国节约能源法〉办法
2008 年	交通运输	《关于印发公路水路交通节能中长期规划纲要的通知》
2009 年	新能源	《关于开展节能与新能源汽车示范推广试点工作的通知》
2009 年	外商投资	《关于加强外商投资节能环保统计工作的通知》
2009 年	清洁发展	《关于中国清洁发展机制基金及清洁发展机制项目实施企业有关企业所得税政策问题的通知》
2009 年	循环经济	《中华人民共和国循环经济促进法》
2010 年	中小企业	《关于进一步加强中小企业节能减排工作的指导意见》
2010 年	能源管理	《关于加快推行合同能源管理促进节能服务产业发展的意见》
2010 年	能源管理	《能源计量监督管理办法》

注：通过相关文件整理得出

为了应对二氧化碳减排压力，近年来我国政府已经出台并实施了一系列的对策，也取得了一定的成效，但减排的力度还远远不够。本文接下来从六个方面对二氧化碳减排对策进行研究。

### 6.3.1 加强政府调控机制

加强政府的宏观调控机制，建立健全减排规划机制，按照经济社会发展的需

要做好能源规划，处理好能源开发利用的关系，不断加强能源管理。充分考虑到化石能源的不可再生性，结合能源资源的禀赋特点，合理地进行资源配置，统筹兼顾各地区、各行业的发展需要。

建立健全二氧化碳减排的考核和问责机制，建立节能减排目标责任制，实施“一票否决”制。全面落实责任，把节能减排的各项工作和任务逐级分解并落实到各个地区和重点企业，并对具体实施情况进行考核和监督，建立科学规范的评价考核体系，确保减排目标的顺利实现。

建立健全二氧化碳减排全方位监督检查机制。我国政府应不断加强减排监督体系建设，完善监督运行机制，提高监督的有效性。重点加强对高耗能企业和污染源头企业的监督检查，对违反环保法律法规的行为依法追究有关主管部门和相关责任人的责任。加大行政监督，加强公众参与和社会监督，加大对节能减排工作的宣传力度，提高节能减排的意识，并加大媒体和舆论的监督力度。

建立健全二氧化碳减排政策法规的执法和监管机制。切实加强节能减排法制建设，强化二氧化碳减排监督管理，加大检查执法力度，重点开展专项执法检查 and 整治活动。强化减排监督管理，完善监督机制，建立和落实节能监测和技术服务工程，依法开展减排执法、监测和监察。

建立健全综合决策机制。建立强有力的减排协调机制，建立健全决策失误责任追究的法律制度，建立健全齐抓共管机制，推动职能部门的联动，实现行政效用最大化，并加强国家能源委员会的战略决策、协调和统筹工作。

### 6.3.2 建立健全节能减排综合机制

建立健全节能减排机制，建立政府、企业和社会的节能减排长效综合机制。发挥政府在节能减排的主导地位，加强节能降耗管理，依法管理和政策激励相结合，加强政府的宏观调控职能，强化政府的公共服务职能，加强节能减排的监督管理，实施重点节能工程，推动节能减排技术的不断更新，并转变政府职能，提高政府的效率，建立和落实相对高效的服务型政府，并深化能源管理体制改革。发挥企业在节能减排工作中的主体作用，充分发挥市场配置资源的作用，合理配置和优化能源结构。不断加快节能技术的开发、应用和推广，大力发展循环经济，推行清洁生产，以企业为主体，正确处理生产经营和节能减排、短期效益和可持续发展的关系，把节能减排融入企业发展战略，推动工作取得更大的成效。

建立减排的激励和制约机制。制定相关的财税政策和其他优惠政策，遏制高耗能企业或行业的发展，大力推进清洁发展机制，发展循环经济。完善资源税、环境税和污染税等相关税种，通过税收杠杆去调节节能减排相关政策。

建立健全开发利用环保机制。制定和实施统一协调的能源和环境政策，积极探索排污权有偿使用政策，完善相关制度，综合运用行政和经济相结合的手段促



进污染较重的企业退出环境补偿机制。

建立健全能源资源开发利用环境补偿机制。建立以政府为导向的符合市场规律的环境补偿机制,构建我国环境补偿法规体系;建立资源开发和环境补偿机制,合理收取生态环境补偿基金;充分利用资源税和环境保证金,适时对当地农民和生态环境进行补偿,并带动当地经济发展。

建立利于节能减排的进出口贸易激励约束机制。限制或禁止外商资本对高耗能、高排放和资源性行业和产品领域的投资,取消这些行业的出口退税,限制高载能、高耗能产品的出口,遏制“两高一资”行业的快速扩张,并鼓励清洁优质能源及先进的节能环保能源技术设备进口。

建立并完善高耗能产品、设备及工艺的淘汰机制。落后生产能力是资源浪费的源头,淘汰落后产能,建立落后产能退出机制,确保产业结构的优化;严把市场准入门槛,严格控制高耗能项目的准入,淘汰落后技术和设备,加快发展低耗能高新技术产业的发展,以高新技术改造传统产业。

建立健全科学用能机制。从能的梯级利用、清洁生产、资源再循环出发,强调利用科技来提高能源利用效率,促进能源利用的有效性。推进资源综合利用示范工程,加强资源综合开发,防止浪费和污染,做好废旧物资的回收再利用。对待能源要按品位逐级加以利用,以实现能源的梯级利用。

建立健全能源服务机制。加快建立节能减排技术服务体系,推进市场化服务机制的建设,各地区各行业应建立节能减排技术服务公司,提供专业化的服务,国家应提供资金支持,以便快速建立健全能源服务机制。

### 6.3.3 优化调整能源结构和经济结构

#### (1) 能源结构调整

以能源战略理念的思想为出发点,做好六个转变:从偏重保障供给为主转变到科学调控能源生产和消费总量;从过度依赖煤炭资源转变为向绿色、多元、低碳化能源发展;从过度依赖国内能源供应要转向立足国内和加强国际合作;从生态环境保护滞后于能源发展向生态环境保护和能源协调发展转变;从资源依赖型的发展模式向科技创新驱动型的发展模式转变;从各能源品种独立发展向多种能源品种互补与系统的融合协调转变。

必须大力推进煤炭产业优化升级,制定行之有效的相关政策,不断优化煤炭产业产能结构,继续推进煤炭企业间的兼并重组,培育大型煤炭企业集团;大力推进能源消费结构优化调整,发展高效清洁低碳能源,不断降低化石能源在一次能源中的消费比重,减少经济发展中原煤的消费量,提高煤炭的转化比重,大力发展煤炭气化和液化技术,提高煤炭转换利用效率;要加大对天然气的开发利用力度,加强天然气储备体系建设,同时要发挥价格杠杆的作用,确保天然气稳定

供应。强化天然气进口渠道建设，扩大天然气、液化天然气进口规模，调整天然气进口和利用等相关政策，加大对天然气的消费量，鼓励替代石油资源；大力发展太阳能、水能、风能、地热、潮汐、生物质能等可再生能源，逐渐加大其在能源消费结构中的比重，并加速可再生资源规模化和产业化的进程。

能源结构调整要坚持节能优先、大力实施能源科技自主创新、促进煤炭绿色生产与清洁利用和发展以电力为核心的能源网络。

## （2）经济结构优化调整

目前我国已进入以重化工业为主的工业化中期阶段，重工业对经济增长的贡献与其他行业相比较大。经济结构调整和产业升级的关键之处在于传统的粗放型经济增长方式向集约型经济增长方式的转变。从长远来看，利用技术进步推动产业结构优化升级是经济结构调整的主要驱动力，同时还要加快对传统制造业和传统服务业进行改造和升级，大力发展现代制造业和现代服务业。

要实现上述经济结构调整目标，必须加快技术进步，推动现代服务业的快速发展，着重发展生产效率高和科技含量高的现代服务业；必须加快高新技术产业的快速发展，以此提高制造业的经济效益；转变经济增长方式，推动技术创新和管理创新。

节能减排是调整经济结构和转变增长方式的有效手段，要通过节能减排以及自主创新能力建设，大力发展高新技术产业和现代服务业，限制高耗能行业的发展，淘汰落后产能，提升传统产业水平，不断推动产业结构优化升级。

### 6.3.4 完善能源价格机制

在我国，政府长期对能源价格进行管制，压低能源价格，使得大量资源被廉价利用，这虽降低了生产成本，也加快了国内的投资扩张，但也造成了资源利用效率不高和能源的过度需求。我国短期内实现了经济的快速增长，但也付出了严重的代价，生态环境遭到严重的破坏。

低于能源成本的能源价格管制造成了能源价格的补贴，补贴降低了企业降低成本的积极性，不利于企业更新技术和设备，而且还给政府造成巨大的财政负担。能源补贴可能是用下一代人的财富和环境成本来贴补我们这一代人，造成了能源资源的严重浪费。由于资源的稀缺性，伴随着强劲的能源需求，能源价格上涨符合市场规律的要求，强行的价格管制，并不意味着价格就不上涨，只不过是另一种方式体现出来，比如电价较低，一些跨国企业把高耗能的生产部门转移到国内，然后把污染和资源消耗留给当地，把工业品出口到国外，体现在出口上面付出的成本可能更大。况且能源价格上涨，并不会对一般价格水平造成太大的影响，至少没有想象的影响那么严重。而且能源价格的上涨能更为有效地抑制需求，避免资源的过度使用和浪费。

因此,要对我国的能源定价机制进行改革,制定好方案合理控制我国的能源消费总量,不断完善能源价格体系,不断完善价格体系,能源价格的合理上升,有利于提高能源的转化和利用效率,还能最大程度地减少能源资源的浪费,也是目前我国减少二氧化碳排放的较为有效的手段。

### 6.3.5 分地区实施减排措施

由于各地区经济发展不平衡,因此二氧化碳减排政策的实施还存在区域上的差异。地方政府实施节能减排的力度受经济发展水平的制约相对较为显著。东部地区处于工业化中后期阶段,工业逐渐让位于服务业;中西部地区目前正处于工业化初期或初期向中期过渡的时期,工业所占比重较高,各个地区面临的节能减排的压力各不相同。因此,国家实行节能减排政策时要统筹兼顾各地区的发展现状,针对不同的地区区别对待,采取不同的措施,这样才能使节能减排的效果达到最优。

首先,要确定差异化的区域节能减排目标,国家在制定节能减排目标时不能“一刀切”,应多做实地调查,并结合各地的经济发展水平、生态环境的容量和敏感度和各地区存在的节能减排的问题以及减排的潜力综合考核,合理地制定节能减排目标,按照“共同但有区别的责任”原则,进一步细化节能减排指标。对待东部发达地区,应严格控制节能减排量,对节能减排目标狠抓落实,严格执行;对中西部地区,应多给予优惠政策,适当放宽节能减排指标,对于生态环境脆弱区和敏感区,严格控制排放总量,统筹安排,制定出更适合当地经济发展的节能减排方案。

其次,由于西部地区经济发展较为落后,节能减排的技术创新和推广使用需要更多的资金支持,中央政府应加大对中西部地区的财政政策和资金支持,完善地方政府间节能减排的横向财政转移支付制度,保障资金转移落实到位,同时还要加大东部发达地区对中西部落后地区的对口支援和扶持力度。

再次,要根据地区间的差异,因地制宜地开展节能减排实践活动。地方政府要结合当地的实际情况,制定有针对性的减排措施,充分合理地利用国家给予的各项优惠政策,加快推进节能重点领域和重点工程建设,探索性地推行节能减排试点政策,寻找适合当地特色经济发展的节能减排路径。

最后,要做好地区间的沟通和交流,建立由国家相关部门牵头,由各地政府相关部门参与的节能减排协调机构,通过定期开展节能减排相关的沟通交流和合作会议,各省之间便于针对节能减排问题以及相关的技术进行及时的交流,有利于各地区之间相互协调和信息之间的交流共享,便于借鉴彼此的经验教训,对各地区顺利完成相应的减排指标有较大的帮助。

### 6.3.6 对高耗能行业实施相应的减排措施

我国长期以来形成的粗放型经济增长方式，造成了高投入、高能耗、低效益等不利于经济持续发展的特征，严重制约了经济的稳定增长和可持续发展。导致与国外先进水平相比，我国的能源利用效率和单位能耗都存在较大的差距，也造成了二氧化碳排放的逐年增加，因此对高耗能行业实施减排措施对我国二氧化碳减排起到至关重要的作用。

根据我国行业的能源消耗数据进行分析可知，钢铁、电力、化工、建材、石化、有色金属等行业消耗了大量的能源资源，而且产品的产值较低，属于高耗能行业。本文针对这几个高耗能行业存在的问题进行探讨，提出一系列相关的减排措施。

#### （1）钢铁行业

钢铁行业是典型的高能耗、高排放行业，能源消耗最为突出，是我国节能减排工作的重中之重。针对钢铁工业存在的问题，未来要提高我国钢铁工业的竞争力，必须发挥市场机制的作用，不断提高行业的集中度、不断推动行业内相关技术的创新、大力发展循环经济，走可持续发展的道路。

产业集中度较低容易导致行业内部的无序过度竞争，行业的技术水平难以得到提升，还造成社会资源的浪费。从国际钢铁工业的发展历程来看，该行业具有较强的规模效应，企业组织规模和经济效益之间相关性较强。因此，国家应出台相关的措施和优惠政策，鼓励企业之间进行兼并重组，并提高行业的准入标准，不断减少行业内企业的数量，扩大生产规模，淘汰落后产能，优化产业布局，优化调整产业内部组织结构，并建立落后产能退出机制。在技术方面，要坚持科技进步推动技术创新，不断引进国外的先进技术和设备，加大科研投入，增强企业的创新能力，改善当前粗放的出口结构，不断提高产品的附加值，实现产业的优化升级，不断提高行业的竞争力，并以循环经济为发展理念，不断提高资源利用效率，加强资源的综合利用，加快生产方式的转变，最大限度的减少排放。

#### （2）电力工业

电力工业作为节能减排的大户，在节能减排实施过程中占据了较为突出的地位，面临的形势也较为严峻。目前电力行业的煤炭消耗量约占全国煤炭产量的一半左右，因此，电力工业的节能减排的实施对于我国二氧化碳的减排具有较为重要的作用。

电力工业可通过以下途径实现节能减排：大力发展超（超）临界机组和大型联合循环机组；采用先进的发电技术去改造现有的火电机组，提高其发电效率；发展热电联产、热电冷联产和热点煤气多联供；采用先进的输、变、配电技术和设备，逐渐淘汰发电效率低而且能耗较高的陈旧设备，降低输、变、配电损耗；

建设并逐步推进先进天然气发电技术用以代替燃油小机组；通过火力发电技术的进步和创新来支撑发电结构的优化调整，提高能源利用效率；同时要不断完善财税政策和准入标准，推动非煤电力的发展，促进核电、水能发电、太阳能发电、风能发电以及生物质等其他新能源发电的增加，减少火电对二氧化碳排放增长的贡献。并在此基础上，进一步明确政府、企业在电力行业节能减排工作中所起的作用，不断降低电力行业整体的二氧化碳排放水平。

### （3）化学工业

化学工业是我国主要的基础原料产业，是我国国民经济发展的主要支柱产业，由于技术和装备相对落后，导致了化学工业不仅消费大量的能源资源，而且给环境造成了很大污染。由于目前化工产业仍是以生产基础原料产品为主，而深加工和精细化工产品所占的比例不大，造成了高耗能的现状短期难以彻底改变，实现化工产业节能减排的目标面临的压力还较大。

针对化工行业现状及存在的问题，今后化工行业领域可以采取如下的节能减排措施：

推动技术创新，技术进步是实现减排的最为有效的措施，据相关研究分析可知，技术进步可以使节约能源的比例达到 40-60%，通过技术创新，可以提高资源的利用效率；加快先进技术的应用推广，依靠科技进步和自主创新，来缩小和国际先进水平之间的差距，由行业主管部门负责筛选关键的技术，并提供专项的节能基金加以推广应用，以促进中小企业的节能减排。同时要大力发展清洁生产技术，在保证化学工业快速发展的同时又达到了节能减排的目标。

尽快完善落后产能淘汰机制，加快淘汰落后产能，运用实施一系列相关政策等手段，建立以市场调节为主以行政手段为辅的落后产能退出机制；要通过延伸化学工业的产业链，提高石化产品的附加值，加快发展资源能源消耗小，科技含量和附加值较高的精细化工产品，形成较为合理的产品结构，不断降低单位产品的能耗水平。

大力发展循环经济，提高能源的综合利用效率。化学工业中使用的能源品种相对较多，品位高低各不相同，可把生产中大量使用的燃料能源以及过程中产生的多种余能有效地结合起来，低位热能的有效利用是提高产业能源利用率的关键之处。

### （4）建材行业

随着我国工业化和城市化进程的不断推进，我国建筑业得到了迅猛的发展，水泥作为建筑业中最大宗的材料，需求量也在飞速增长。我国是世界上水泥生产量和消耗量最大的国家，水泥生产过程中也会带来大量的二氧化碳排放，其中排放量要占工业排放量的近两成左右，因此，建材行业的节能减排对二氧化碳的减排贡献也较为显著。

近年来，建材行业特别是水泥工业的技术也在不断进步，使得行业整体的节能水平和环保水平都上了一个新的台阶，但是面对越来越大的二氧化碳排放压力，水泥工业还有待进一步推进节能减排。

国家已出台一系列相关的政策和措施，下一步要加大对政策的执行力度，加强检查监督，严格执行落后生产能力的推出机制，而且要继续制定并执行切实可行的宏观调控政策，从大的层面控制水泥工业的过快无序增长。

继续研发节能技术与装备，不断更新现有技术设施，进一步提高新建生产线的生产效率和能源利用效率，尽快与国际先进技术接轨，尽力降低能耗水平。

加大利用工业废渣、污泥和可燃废弃物等生产水泥的力度，减少对天然矿物和燃料资源的消费量，大力发展循环经济，提高水泥工业废料等的综合利用水平，降低能耗的同时还能减少二氧化碳的排放。

#### （5）有色金属工业

有色金属是指铁、锰、铬以外的所有金属的统称，该工业包含有色金属矿采选业、冶炼和压延加工业。近年来，有色金属行业通过循环经济的发展，能耗指标不断降低，而且污染物的排放水平也进一步降低。但由于产量增长的较快，排放的压力依然较大。

我国有色金属产业的资源保障率较低，资源供需矛盾较为突出。因此对待有色金属产业，我国应适当放宽有色金属废料进口许可，鼓励国内企业进口有色金属废料，并完善有色金属废料加工利用政策；加大对有色金属的科技投入力度，重点围绕有色金属产业发展循环经济中遇到的重大难题和关键技术进行资金和科技投入，并引进国外的先进技术和设备，不断提升有色金属行业的技术和装备水平；同时还要加大环保的投入力度，通过技术改造不断提升资源的综合利用水平和环境治理水平，减少污染物和二氧化碳的排放。

## 6.4 本章小结

本章在上述章节分析的基础上，结合上一章因素分解的分析结果，对二氧化碳减排影响因素进行研究，主要分析了各省经济产出、农村人口比重以及全国人口数量、能源消费结构、经济结构（产业结构）和能源强度等因素对节能减排效果的影响。通过分析可知，能源消费结构和产业结构调整对二氧化碳的减排作用较为明显。

第二节对能源消费结构和产业结构调整以及不同组合情景下碳强度目标进行分析。本节采用灰色系统模型和马尔科夫链模型相结合对能源消费结构和产业结构进行分析预测，并结合约束目标对预测结构进行调整，然后考虑能源消费结构、产业结构和经济发展速度分情景下进行组合分析，并分析计算每种情景下碳

强度目标的预测值，然后对碳强度预测结果进行分析。通过分析发现，本文的分析方法实现我国政府对外承诺的约束目标“到 2020 年我国单位 GDP 二氧化碳排放量比 2005 年减少 40-45%”不可行，但这与预测方法存在的误差、计算二氧化碳排放量时部分相关数据缺失或较难统计以及所采用的是不变价的 GDP 存在很大的关系，故在考虑这些因素的情况下，碳强度约束目标实现还是存在较大的可能性。

针对以上的分析，二氧化碳的减排单靠调整约束其中的某两个因素实现起来还存在较大的难度，因此对二氧化碳减排对策研究要从多方面多角度入手，综合各个影响因素去分析，在宏观调控方面应该加强政府的宏观调控职能，建立健全节能减排相关的综合机制，从政策层面去调整二氧化碳减排，然后结合能源结构调整和产业结构调整以及能源价格调整等因素对减排实施相关措施，最后结合各个区域各个行业的实际情况，具体情况具体分析，分别采取行之有效的措施使二氧化碳的减排效果达到最佳。





## 7 结论与展望

二氧化碳排放问题已成为国际社会普遍关注的热点话题之一,随着我国社会经济的飞速发展,对能源资源的消耗量也在逐年加大,由此所带来的二氧化碳排放量逐年增多,目前已超过美国成为第一大二氧化碳排放国,面临的二氧化碳减排压力也在不断加大。在这样的国际背景下,对我国二氧化碳排放增长驱动因素的分析和研究就显得越来越重要。

### 7.1 主要结论

本文研究以经济学、现代管理学、统计学、指数分解理论、随机过程论、灰色系统理论、优化论为基础,采用定性分析与定量研究相结合的方法,以国内外相关研究成果为基础,剖析我国二氧化碳排放增长现状及形成的原因,并估算了历年能源活动和工业生产活动的二氧化碳排放清单;然后以省级数据为依据运用指数分解法对二氧化碳排放增长影响因素进行分解,并对各主要影响因素进行分析;结合我国减排优化目标,针对上述主要影响因素进行研究,并重点对能源结构调整和产业结构调整目标进行优化,并在不同的组合情景下对 2020 年碳强度目标进行测算,并依据测算结果分析减排目标实现的可能性;最后在综合考虑资源、环境、碳排放控制总量等因素约束条件下,提出了我国二氧化碳减排的对策和措施,并对分地区分行业的节能减排对策进行研究。

通过以上分析,本文研究的主要结论如下:

(1) 针对我国二氧化碳排放现状,结合我国发布的《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》,分析得出了我国二氧化碳排放的主要来源是能源活动和工业生产活动;在此基础上,借鉴 IPCC 提供的估算方法和其他学者的研究成果,本文通过对排放系数进行细分,改进并完善了二氧化碳排放量计算方法,并采用此法对能源活动和工业生产活动中产生的二氧化碳排放量进行计算,得出了相关年份的二氧化碳排放清单,并对我国排放总体情况进行对比分析。

(2) 在对我国二氧化碳排放清单分析的基础上,对我国二氧化碳排放特征进行对比研究,其中主要包括区域特征和行业特征。

根据我国统计年鉴中提供的各省数据,结合我国经济区域的划分办法,分别对东部、中部、西部和东北四大地区的排放量数据进行计算,并结合各地区经济的发展现状进行分析,得出了分地区各省份二氧化碳排放比重以及二氧化碳排放趋势图,从而可以直观地看出各地区二氧化碳的排放走势。

按照统计年鉴中的行业分类,分别对农业、工业、建筑业、交通运输业、批

发零售餐饮业、生活消费和其他行业等七大类进行分析，得出了我国分行业二氧化碳排放比重。从分析结果可知，工业在历年二氧化碳排放中占比都在 70%以上，是二氧化碳排放增长的主要贡献者；并依据对工业的分类，分别对采掘业、制造业以及电力、煤气及生产和供应业三大类进行分析，最后得出制造业排放的二氧化碳量占工业总排放量的 80%以上，是工业二氧化碳排放增长的主要贡献者。

(3) 对我国二氧化碳排放的影响因素进行了分析。结合现状对二氧化碳排放因素进行研究，得出主要的影响因素有人口数量、GDP、能源消费总量、能源消费结构、经济结构、城市化水平、工业化水平、能源强度、技术进步、能源价格、交通工具数量、林业和生态保护建设等，并对各个影响因素进行深入分析。

(4) 采用 LMDI 模型对我国二氧化碳排放影响因素进行分解研究。

在对比分析了常用的两种分解方法 Laspeyres 分解法和 Divisia 分解法的基础上，重点介绍了 LMDI 和 AMDI 分解模型，最后选取 LMDI 模型作为本文分解研究的模型。

将我国二氧化碳排放总量分解为国内 30 个省级单位 7 个部门 8 种能源品种排放二氧化碳量的总和，建立了基于 LMDI 的指数分解模型；以 1997-2010 年我国时间序列数据为准对二氧化碳排放增长进行分解研究，通过运用 MATLAB7.0 和 EXCEL 对模型进行计算，最终得出各个影响因素对我国二氧化碳排放总量增长的贡献率。

对模型的计算结果进行详细分析。通过模型求解结果对各个时期影响因素进行分析，得出各个时期对二氧化碳排放增长做出较大贡献的因素，并结合省级分量数据进行解释说明，进而对各种影响因素进行归纳分类，并分别对强度、结构和规模三类效应进行分析。

(5) 通过定性分析和定量研究相结合的方法对二氧化碳减排因素进行分析，并结合碳强度约束目标对减排目标进行优化研究。结合分解模型定量分析的结果，对各省经济产出、人口比重、能源结构、经济结构和能源强度等主要的影响因素进行定性分析；通过分析确定对能源消费结构和产业结构进行优化调整，并结合我国可再生能源约束目标和经济发展速度，分不同的组合情景对未来碳排放目标进行分析和预测，并对碳排放目标实现的可能性进行研究。

(6) 分别从加强政府调控机制、建立健全节能减排综合机制、优化调整能源消费结构和产业结构、完善能源价格机制、以及分地区分行业等六个层面对我国二氧化碳减排对策进行研究。

## 7.2 论文的主要创新点

通过研究，本文的创新点主要体现在以下三个方面：

(1) 根据 IPCC 提出的二氧化碳估算原理, 通过对排放系数进行细分, 改进了二氧化碳排放量计算模型, 估算了能源利用与工业生产中二氧化碳的排放量, 建立了 1991-2010 年的二氧化碳排放清单, 并分析了二氧化碳排放的区域和行业特征。

(2) 运用指数分解法对我国二氧化碳排放增长影响因素进行分解研究; 构建了基于 LMDI 的分解模型, 通过 MATLAB 和 EXCEL 求解得出了各个影响因素对我国二氧化碳排放增长的贡献率, 并详细分析了各个时期的影响因素, 且对模型中的影响因素进行分类研究。

(3) 基于我国政府承诺的碳强度目标, 运用灰色系统理论和马尔科夫链模型分析了不同能源消费结构、产业结构以及经济增长组合情景下, 我国碳强度目标实现的可能性。

### 7.3 研究展望

二氧化碳排放过程本身是一个较为复杂的系统, 包含诸多影响因素, 尤其是对一些不可量化的因素, 要对其透彻分析难度较大。本文尝试从指数分解层面对二氧化碳排放影响因素进行分析, 取得了一定的研究成果, 但由于受作者水平以及文献统计资料等条件的限制, 还存在许多问题有待进一步深入研究。

(1) 本文对二氧化碳排放量进行估算, 并对各个行业历年二氧化碳排放清单进行编制, 但最后的清单涉及到的只是总量数据, 下一步可以进一步收集统计资料, 编制更为详细的排放清单。

(2) 论文采用指数分解法对我国二氧化碳排放因素进行分析, 且涉及到省级的统计数据, 并把工业从经济部门分类中剥离出来单独分析, 但各个行业的特点各不相同, 下一步可尝试把其他几个行业分别独立出来构建模型, 这样模型更具有应用价值。

(3) 减排的影响因素较多, 对排放增长的效果各不相同, 只考虑能源消费结构和产业结构的优化调整对二氧化碳减排的分析不够全面, 下一步应考虑把更多可量化的且对二氧化碳排放贡献率较大的影响因素纳入到组合情景分析中。

(4) 本文对二氧化碳减排对策研究更多侧重于从宏观方向的定性分析, 下一步要侧重微观方面的定量研究。



## 参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007
- [2] 秦大河, 罗勇, 陈振林等. 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 311-314
- [3] 李尚竹. 如何实现从“国富民穷”到“国富民富”的转变[J]. 经济导刊, 2011, (05): 12-13
- [4] 王炜. 专家解读政府工作报告[J]. 科技与企业, 2012, (05): 3-4
- [5] 张炎治, 聂锐. 能源强度的指数分解分析研究综述[J]. 管理学报, 2008, (05): 647-650.
- [6] Ang B W. Decomposition methodology in industrial energy demand analysis. Energy, 1995, 20: 1081-1095.
- [7] Ana B W, Zhana F Ca. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental analysis. Energy. 2000, 25:1149-1176.
- [8] K. Liaskas, G. Mavrotas, M. Mandaraka, D. Diakoulaki, 2000. Decomposition of industrial CO<sub>2</sub> emissions: The case of European Union. Energy Economics, 22(4), 383-394
- [9] B.W. Ang, F.Q. Zhang, 2000. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. Energy, 25(12), 1149-1176
- [10] Cheng F. Lee, Sue J. Lin, 2001. Structural decomposition of CO<sub>2</sub> emissions from Taiwan's petrochemical industries. Energy Policy, 29(3), 237-244
- [11] Johan Albrecht, Delphine François, Koen Schoors, 2002. A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals. Energy Policy, 30 (9), 727-736
- [12] Ki-Hong Choi, B.W. Ang, 2002. Measuring thermal efficiency improvement in power generation: the Divisia decomposition approach. Energy, 27(5), 447-455
- [13] Rutger Hoekstra, Jeroen C.J.M. van den Bergh, 2003. Comparing structural decomposition analysis and index. Energy Economics, 25(1), 39-64
- [14] Ki-Hong Choi, B.W. Ang, 2003. Decomposition of aggregate energy intensity changes in two measures: ratio and difference. Energy Economics, 25(6), 615-624
- [15] B.W. Ang, F.L. Liu, Hyun-Sik Chung, 2004. A generalized Fisher index approach to energy decomposition analysis. Energy Economics, 26(5), 757-763
- [16] Winfried G. Hallerbach, 2005. An alternative decomposition of the Fisher index. Economics Letters, 86(2), 147-152
- [17] B.W. Ang, 2005. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide Energy Policy, 33(7), 867-871
- [18] Tae-Hyeong Kwon, 2005. Decomposition of factors determining the trend of CO<sub>2</sub> emissions from car travel in Great Britain (1970–2000). Ecological Economics, 53(2), 261-275
- [19] Subhes C. Bhattacharyya, Arjaree Ussanarassamee, 2005. Changes in energy intensities of Thai industry between 1981 and 2000: a decomposition analysis. Energy Policy, 33(8), 995-1002
- [20] B.W. Ang, N. Liu, 2006. A cross-country analysis of aggregate energy and carbon intensities Energy Policy, 34(15), 2398-2404
- [21] Richard Wood, Manfred Lenzen, 2006. Zero-value problems of the logarithmic mean Divisia index decomposition method. Energy Policy, 34(12), 1326-1331
- [22] Manfred Lenzen, 2006. Decomposition analysis and the mean-rate-of-change index. Applied

- Energy, 83(3), 185-198
- [23] D. Diakoulaki, G. Mavrotas, D. Orkopoulos, L. Papayannakis, 2006. A bottom-up decomposition analysis of energy-related CO<sub>2</sub> emissions in Greece. *Energy*, 31(14), 2638-2651
- [24] Wietze Lise, 2006. Decomposition of CO<sub>2</sub> emissions over 1980–2003 in Turkey. *Energy Policy*, 34(14), 1841-1852
- [25] Yuk-shing Cheng, Sung-ko Li, 2006. Income inequality and efficiency: A decomposition approach and applications to China. *Economics Letters*, 91(1), 8-14
- [26] B.W. Ang, Na Liu, 2007. Energy decomposition analysis: IEA model versus other methods *Energy Policy*, 35(3), 1426-1432
- [27] B.W. Ang, Na Liu, 2007. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach. *Energy Policy* 35(1), 238-246
- [28] B.W. Ang, Na Liu, 2007. Negative-value problems of the logarithmic mean Divisia index decomposition approach. *Energy Policy*, 35(1), 739-742
- [29] D. Diakoulaki, M. Mandaraka, 2007. Decomposition analysis for assessing the progress in decoupling industrial growth from CO<sub>2</sub> emissions in the EU manufacturing sector. *Energy Economics*, 29(4), 636-664
- [30] Shinichiro Okushima, Makoto Tamura, 2007. Multiple calibration decomposition analysis: Energy use and carbon dioxide emissions in the Japanese economy, 1970–1995. *Energy Policy*, 35(10), 5156-5170
- [31] Esteban Fernández, Paula Fernández, 2008. An extension to Sun's decomposition methodology: The Path Based approach. *Energy Economics*, 30(3), 1020-1036
- [32] Emmanouil Hatzigeorgiou, Heracles Polatidis, Dias Haralambopoulos, 2008. CO<sub>2</sub> emissions in Greece for 1990–2002: A decomposition analysis and comparison of results using the Arithmetic Mean Divisia Index and Logarithmic Mean Divisia Index techniques. *Energy*, 33(3), 492-499
- [33] P. Zhou, B.W. Ang, 2008. Decomposition of aggregate CO<sub>2</sub> emissions: A production-theoretical approach. *Energy Economics*, Volume 30, Issue 3, May 2008, Pages 1054-1067
- [34] Chunbo Ma, David I. Stern, 2008. China's changing energy intensity trend: A decomposition analysis. *Energy Economics*, 30(3), 1037-1053
- [35] B.W. Ang, H.C. Huang, A.R. Mu, 2009. Properties and linkages of some index decomposition analysis methods. *Energy Policy*, 37(11), 4624-4632
- [36] Katerina Papagiannaki, Danae Diakoulaki, 2009. Decomposition analysis of CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars: The cases of Greece and Denmark. *Energy Policy*, 37(8), 3259-3267
- [37] Sunil Malla, 2009. CO<sub>2</sub> emissions from electricity generation in seven Asia-Pacific and North American countries: A decomposition analysis. *Energy Policy*, 37(1), 1-9
- [38] Ilyoung Oh, Walter Wehrmeyer, Yacob Mulugetta, 2010. Decomposition analysis and mitigation strategies of CO<sub>2</sub> emissions from energy consumption in South Korea. *Energy Policy*, 38(1), 364-377
- [39] Yanli Dong, Masanobu Ishikawa, Xianbing Liu, Can Wang, 2010. An analysis of the driving forces of CO<sub>2</sub> emissions embodied in Japan–China trade. *Energy Policy*, 38(11), 6784-6792
- [40] Claudia Sheinbaum, Leticia Ozawa, Daniel Castillo, 2010. Using logarithmic mean Divisia index to analyze changes in energy use and carbon dioxide emissions in Mexico's iron and steel industry. *Energy Economics*, 32, (6), 1337-1344
- [41] B. Sudhakara Reddy, Binay Kumar Ray, 2010. Decomposition of energy consumption and energy intensity in Indian manufacturing industries. *Energy for Sustainable Development*, 14, (1), 35-47
- [42] Gürkan Kumbaroğlu, 2011. A sectoral decomposition analysis of Turkish CO<sub>2</sub> emissions over

- 1990–2007. *Energy*, Volume 36, Issue 5, 2419-2433
- [43] William Chung, M.S. Kam, C.Y. Ip, 2011. A study of residential energy use in Hong Kong by decomposition analysis, 1990–2007. *Applied Energy*, Volume 88, Issue 12, 5180-5187
- [44] Isabela Butnar, Maria Llop, 2011. Structural decomposition analysis and input–output subsystems: Changes in CO<sub>2</sub> emissions of Spanish service sectors (2000–2005). *Ecological Economics*, Volume 70, Issue 11, 2012-2019
- [45] Elif Akbostancı, Gül İpek Tunç, Serap Türüt-Aşık, 2011. CO<sub>2</sub> emissions of Turkish manufacturing industry: A decomposition analysis. *Applied Energy*, 88(6), 2273-2278
- [46] Alvydas Baležentis, Tomas Baležentis, Dalia Streimikiene, 2011. The energy intensity in Lithuania during 1995–2009: A LMDI approach. *Energy Policy*, 39(11), 7322-7334
- [47] Ki-Hong Choi, B.W. Ang, 2012. Ang Attribution of changes in Divisia real energy intensity index — An extension to index decomposition analysis. *Energy Economics*, 34(1), 171-176
- [48] Colin Wren, 2012. Geographic concentration and the temporal scope of agglomeration economies: An index decomposition. *Regional Science and Urban Economics*, 42(4), 681-690
- [49] Bin Su, B.W. Ang, 2012. Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: Some methodological developments. *Energy Economics*, 34(1), 177-188
- [50] Claudia Sheinbaum-Pardo, Sergio Mora-Pérez, Guillermo Robles-Morales, 2012. Decomposition of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in Mexican manufacturing industries: Trends between 1990 and 2008. *Energy for Sustainable Development*, 16(1), 57-67
- [51] Tadhg O' Mahony, Peng Zhou, John Sweeney, 2012. The driving forces of change in energy-related CO<sub>2</sub> emissions in Ireland: A multi-sectoral decomposition from 1990 to 2007. *Energy Policy*, 44(5), 256-267
- [52] G.P. Hammond, J.B. Norman, 2012. Decomposition analysis of energy-related carbon emissions from UK manufacturing. *Energy*, 41(1), 220-227
- [53] 张明. 基于指数分解的我国能源相关 CO<sub>2</sub> 排放及交通能耗分析与预测[D]. 大连理工大学, 博士学位论文, 2009.
- [54] 邓晓. 基于 LMDI 方法的碳排放的因素分解模型及实证研究——以湖北省为例[D]. 华中科技大学, 硕士学位论文, 2009.
- [55] 徐国泉. 中国能源效率问题研究[D]. 大连理工大学, 博士学位论文, 2008.
- [56] 贺红兵. 我国碳排放影响因素分析[D]. 华中科技大学, 博士学位论文, 2012.
- [57] 薛勇, 郭菊娥, 孟磊. 中国 CO<sub>2</sub> 排放的影响因素分解与预测[J]. *中国人口.资源与环境*. 2011(05): 106-112.
- [58] 刘兰翠. 我国二氧化碳减排问题的政策建模与实证研究[D]. 中国科学技术大学, 博士学位论文, 2006
- [59] 杨国锐. 中国经济发展中的碳排放波动及减碳路径研究[D]. 华中科技大学, 博士学位论文, 2010
- [60] 蔡伟光. 中国建筑能耗影响因素分析模型与实证研究[D]. 重庆大学, 博士学位论文, 2011
- [61] 张纪录. 消费视角下的我国二氧化碳排放研究[D]. 华中科技大学, 博士学位论文, 2012
- [62] 聂锐, 王迪. 中国能源消费的 CO<sub>2</sub> 排放变动及其驱动因素分析[J]. *中国矿业大学学报(社会科学版)*, 2011, 13(1): 73-78.
- [63] 国涓. 中国能源强度变动的成因及效应研究[D]. 大连理工大学, 博士学位论文, 2010.
- [64] 郭朝先. 中国碳排放因素分解: 基于 LMDI 分解技术[C]. //2010 中国可持续发展论坛论文集. 2010: 116-120.

- [65] 刘俊杰, 贾兴梅. 中国碳排放强度变化的分解与减排途径分析——基于 AWD 分解因素模型[C]. //第十二届中国管理科学学术年会论文集. 2010: 502-508.
- [66] 李志强, 王宝山. 基于因素分解模型的二氧化碳排放影响因素分析——以山西为例[J]. 生产力研究, 2010, (12): 99-101.
- [67] 李艳梅, 张雷, 程晓凌等. 中国碳排放变化的因素分解与减排途径分析[J]. 资源科学, 2010, 32(2):218-222.
- [68] 顾成军, 龚新蜀. 1999-2009 年新疆能源消费碳排放的因素分解及实证研究[J]. 地域研究与开发, 2012, 31(3): 140-144.
- [69] 徐雅楠, 杜志平. 我国交通运输业的碳排放测度及因素分解[J]. 物流技术, 2011, 30(6): 16-18,45.
- [70] 雷厉, 仲云云, 袁晓玲等. 中国区域碳排放的因素分解模型及实证分析[J]. 当代经济科学, 2011, (5): 59-65.
- [71] 徐盈之, 徐康宁, 胡永舜等. 中国制造业碳排放的驱动因素及脱钩效应[J]. 统计研究, 2011, 28(7):55-61.
- [72] 周勇, 李廉水. 中国能源强度变化的结构与效率因素贡献——基于 AWD 的实证分析[J]. 产业经济研究, 2006(4): 68~74.
- [73] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析: 1995-2004[J]. 中国人口.资源与环境. 2006(06): 158-161
- [74] 吴巧生, 成金华. 中国工业化中的能源消耗强度变动及因素分析——基于分解模型的实证研究[J]. 财经研究, 2006, 32(6): 75~85.
- [75] 吴巧生, 成金华. 中国能源消耗强度变动及因素分解: 1980~2004[J]. 经济理论与经济管理, 2006(10): 34~40.
- [76] 康梅. 投资增长模式下经济增长因素分解与经济增长质量[J]. 数量经济技术经济研究, 2006(02):153-160.
- [77] 查冬兰, 周德群. 地区能源效率与二氧化碳排放的差异性——基于 Kaya 因素分解[J]. 系统工程, 2007, 25(11): 65-71.
- [78] 李凯, 李明玉, 郁培丽等. 辽宁省能源消费的因素分解——基于完全分解模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(11): 1656-1659
- [79] 李政, 付峰, 高丹等. 中国特大城市客运交通能源需求变化的因素分解[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008 (11): 1769-1772
- [80] 李国璋, 王双. 中国能源强度变动的区域因素分解分析——基于 LMDI 分解方法[J]. 财经研究, 2008, 34(8): 52-62.
- [81] 谭忠富, 蔡丞恺. 北京市能源强度分析的完全因素分解方法[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2008 (6): 28-31,46.
- [82] 王伟林, 黄贤金. 区域碳排放强度变化的因素分解模型及实证分析——以江苏省为例[J]. 生态经济, 2008,(12): 32-35.
- [83] 宋德勇、卢忠宝等. 中国碳排放影响因素分解及其周期性波动研究[J]. 中国人口.资源与环境. 2009(03): 18-24
- [84] 刘叶, 王磊. 我国工业能源强度变动的影响因素分解分析——基于 LMDI 分解法[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2009, 11(4): 66-70.
- [85] 刘红光, 刘卫东. 中国工业燃烧能源导致碳排放的因素分解[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 285-292.
- [86] 刘燕娜, 洪燕真, 余建辉等. 福建省碳排放的因素分解实证研究[C]. //中国生态经济建



- 设 2010 太原论坛论文集. 2010: 334-343.
- [87] 王俊松, 贺灿飞. 能源消费、经济增长与中国 CO<sub>2</sub> 排放量变化——基于 LMDI 方法的分解分析[J]. 长江流域资源与环境. 2010(01):18-23
- [88] Zha Donglan, Zhou Dequn, Zhou Peng, 2010. Driving forces of residential CO<sub>2</sub> emissions in urban and rural China: An index decomposition analysis. *Energy Policy*, 38(7), 3377-3383
- [89] 王锋, 吴丽华, 杨超等. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究[J]. 经济研究. 2010 (02): 123- 136
- [90] 赵奥, 武春友. 中国 CO<sub>2</sub> 排放量变化的影响因素分解研究——基于改进的 Kaya 等式与 LMDI 分解法[J]. 软科学, 2010, 24(12): 55-59
- [91] 查建平, 唐方方, 傅浩等. 产业视角下的中国工业能源碳排放 Divisia 指数分解及实证分析[J]. 当代经济科学, 2010, 32(5): 88-94.
- [92] 田立新, 张蓓蓓. 中国碳排放变动的因素分解分析[J]. 中国人口. 资源与环境. 2011(11): 1-7
- [93] 李国志, 李宗植, 周明等. 东部地区能源碳排放的省域比较及因素分解[J]. 当代经济管理, 2011, 33(10): 48-52.
- [94] 高彩玲, 高歌, 田采霞等. 河南省能源消费碳排放的因素分解及减排途径[J]. 中国矿业, 2011, 20(3): 46-49.
- [95] 国涓, 侯芳凝. 能源强度变动的多因素分解方法研究[J]. 数学的实践与认识, 2011, 41(7): 91-97.
- [96] 邢璐, 单葆国. 基于 Kaya 公式的中国 CO<sub>2</sub> 排放影响因素分解[J]. 能源技术经济, 2011, 23(10): 46-50.
- [97] 郑慕强. 东盟五国能源消费与碳排放因素分解分析[J]. 经济问题探索, 2012,(2): 145-150
- [98] 贺红兵. 中国碳排放的影响因素分析[J]. 经济研究导刊, 2012, (15): 24,35.
- [99] 宋杰鲲. 基于 LMDI 的山东省能源消费碳排放因素分解[J]. 资源科学, 2012, 34(1): 35-41
- [100] 张秋菊, 王平, 朱帮助等. 基于 LMDI 的中国能源消费碳排放强度变化因素分解[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(13): 79-86.
- [101] 张丽峰. 中国能源供求预测模型及发展对策研究[D]. 首都经济贸易大学, 博士学位论文, 2006.
- [102] 沈玉志. 中国能源发展的决策模型研究[D]. 辽宁工程技术大学, 博士学位论文, 2004.
- [103] R.E. Abdel-Aal, 2008. Univariate modeling and forecasting of monthly energy demand time series using abductive and neural networks. *Computers & Industrial Engineering*, 54(4), 903-917
- [104] G.J. Tsekouras, E.N. Dialynas, N.D. Hatziaargyriou, S. Kavatza. A non-linear multivariable regression model for midterm energy forecasting of power systems. *Electric Power Systems Research*, 77(12), 1560-1568
- [105] Thomas Mestekemper, Göran Kauermann, Michael S. Smith. A comparison of periodic autoregressive and dynamic factor models in intraday energy demand forecasting. *International Journal of Forecasting*, 29(1), 1-12
- [106] In-Bong Kang, 2003. Multi-period forecasting using different models for different horizons: an application to U.S. economic time series data. *International Journal of Forecasting*, 19(3), 387-400
- [107] Aliyeh Kazemi, Amir Foroughi. A, Mahnaz Hosseinzadeh, 2012. A Multi-Level Fuzzy Linear Regression Model for Forecasting Industry Energy Demand of Iran. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 41, 342-348
- [108] L. Suganthi, Anand A. Samuel, 2012. Energy models for demand forecasting—A review.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(2), 1223-1240
- [109]李亮, 孙廷容, 黄强等. 灰色 GM(1,1)和神经网络组合的能源预测模型[J]. 能源研究与利用, 2005, (1): 10-13.
- [110]陶然, 蔡云泽, 楼振飞等. 国内外能源预测模型和能源安全评价体系研究综述[J]. 上海节能, 2012, (1): 16-21.
- [111]孙爱存. 几种能源产量预测模型的预测效果比较[J]. 统计与决策, 2008,(9): 159-160.
- [112]孙涵, 杨普容, 成金华等. 基于 Matlab 支持向量回归机的能源需求预测模型[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(10): 2001-2007.
- [113]冯述虎, 侯运炳. 基于时序分析与神经网络的能源产量预测模型[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2003, 22(2): 168-171.
- [114]卢奇, 顾培亮, 邱世明等. 组合预测模型在我国能源消费系统中的建构及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(3): 24-30.
- [115]周强. 灰色马尔可夫链预测模型对我国能源需求量的预测[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2009, 11(3): 179-182.
- [116]付娟, 金菊良, 魏一鸣等. 基于遗传算法的中国清洁能源需求 Logistic 预测模型[J]. 水电能源科学, 2010, 28(9): 175-178.
- [117]王珏, 鲍勤. 基于小波神经网络的中国能源需求预测模型[J]. 系统科学与数学, 2009, 29(11): 1542-1551.
- [118]秦晋栋. 基于熵权灰色组合预测模型的区域能源需求预测研究[J]. 价值工程, 2012, 31(4): 289-291.
- [119]谢妍, 李牧等. 基于遗传算法优化的 GM(1,1)能源预测模型研究[J]. 中国管理信息化, 2009, 12(19): 95-97.
- [120]索瑞霞, 王福林. 组合预测模型在能源消费预测中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(18): 80-85.
- [121]王会强, 胡丹. 能源需求组合预测模型的构建和应用研究[J]. 中国能源, 2007, 29(8): 38-40.
- [122]侯建朝. 中国能源与经济之间关系的模型及实证分析[D]. 华北电力大学, 博士学位论文, 2009.
- [123]Anil Singh, S. Gangopadhyay, P.K. Nanda, S. Bhattacharya, C. Sharma, C. Bhan. 2008. Trends of greenhouse gas emissions from the road transport sector in India .Science of The Total Environment, 390(1), 124-131
- [124]José M. Baldasano, Cecilia Soriano, Lluís Boada. 1999. Emission inventory for greenhouse gases in the City of Barcelona, 1987–1996. Atmospheric Environment, 33(23), 3765-3775
- [125]蔡博峰, 刘春兰, 陈操操等. 城市温室气体清单研究[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009
- [126]蔡博峰. 中国城市二氧化碳排放研究[J]. 中国能源. 2011(06): 28-32
- [127]袁晓辉, 顾朝林. 北京城市温室气体排放清单基础研究[J]. 城市环境与城市生态. 2011(01): 1-4
- [128]杨谨, 鞠丽萍, 陈彬等. 重庆市温室气体排放清单研究与核算[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(3): 63-69.
- [129]曹国良, 张小曳, 王丹等. 中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单[J]. 中国环境科学, 2005, 25(4): 389-393.
- [130]谢士晨, 陈长虹, 李莉等. 上海市能源消费 CO<sub>2</sub> 排放清单与碳流通图[J]. 中国环境科学, 2009, 29(11): 1215-1220.
- [131]刘思峰等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010

- [132]唐丽芳, 贾冬青, 孟庆鹏. 用 MATLAB 实现灰色预测 GM(1,1)模型[J]. 沧州师范专科学校学报, 2008,(02): 35-37
- [133]刘奇志. 基于 Markov 链的网络决策分析方法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011
- [134]樊平毅. 随机过程理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [135]中华人民共和国气候变化初始国家信息通报[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004
- [136]中华人民共和国国家统计局. 2008 中国统计年鉴[M]. 中国统计出版社, 2009
- [137]魏一鸣, 刘兰翠, 范英, 吴刚等. 中国能源报告(2008): 碳排放研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [138]王锋等. 中国碳排放增长的驱动因素及减排政策评价[M]. 北京: 经济科学出版社, 2011
- [139]郑有飞, 李海涛, 吴荣军, 王连喜. 技术进步对中国 CO<sub>2</sub> 减排的影响[J]. 科学通报, 2010, (16): 1555-1564
- [140]王铮, 蒋轶红, 吴静等. 技术进步作用下中国 CO<sub>2</sub> 减排的可能性[J]. 生态学报, 2006, (02): 423-431
- [141]魏巍贤, 杨芳. 技术进步对中国二氧化碳排放的影响[J]. 统计研究, 2010,(07): 36-44
- [142]Sun, J.W., 1998. Changes in energy consumption and energy intensity: a complete decomposition model. *Energy Econ.* 20(1), 85-100
- [143]Zhang, F. Q., Ang, B. W., 2001. Methodological issues in cross-country/region decomposition of energy and environment indicators. *Energy Economics* 23 (2), 179-190
- [144]Ang, B. W., 2004. Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? *Energy Policy* 32, 1131-1139
- [145]Wu Libo, Kaneko Shinji, Matsuoka Shunji. Driving Forces Behind the Stagnancy of China's Energy-related CO<sub>2</sub> Emissions from 1996 to 1999: The Relative Importance of Structural Change, Intensity Change and Scale Change [J]. *Energy Policy*, 2005(33):319-335
- [146]Wu Libo, Kaneko Shinji, Matsuoka Shunji. Dynamics of Energy-related CO<sub>2</sub> Emissions in china during 1980 to 2002: The Relative Importance of Energy Supply-side and Demand-side Effects [J]. *Energy Policy*, 2006, 34(18): 3549-3572



## 致 谢

时光转瞬即逝，转眼间博士三年的研究生生涯即将结束，从 2010 年 5 月开始，我就来到了矿大，加入了能源经济研究所这个团队，回想起度过的三年时光，我收获颇多，也得到了老师、同学和朋友们的帮助，在论文即将完成之际，向他们表示衷心的感谢！

首先，我要感谢我的导师王立杰教授，本文从论文的选题到提纲的拟定，从论文的建模到最终的完稿都是在王老师的指导和帮助下完成的，王老师严谨的治学态度、深厚的专业功底、朴素的生活作风以及诚挚的高贵品格都令人十分难忘，值得我在以后的工作和生活中去不断学习；同时感谢师母乔大夫三年来在日常生活和学习上对我的关怀和帮助，在此谨向恩师和师母致以最崇高的敬意和最衷心的感谢。

其次，感谢管理学院的各位老师，特别是给我讲过课的丁日佳教授、刘海滨教授等等；感谢能源经济研究所的宋梅老师，三年来我从你那里学到了很多知识，很欣赏宋老师做事认真的态度，这些对我以后工作和生活都会有很大帮助；还要感谢能源经济研究所的汪文生老师和孙长云老师以及已毕业的师兄师姐们，他们也给了我很大的帮助；感谢三年来曾在 709 度过的同门兄弟姐妹，回想起那段一块做项目、周末一块爬山游玩的快乐时光，心情顿感舒畅，这段美好的回忆使人终身难忘。

然后要感谢我的舍友和我的同学，感谢孙旭东博士、江书军博士、刘屹博士、杨洋博士、尹锋博士等，是你们陪我度过了三年的博士研究生生涯，使我的博士生活在紧张的同时有了更多的轻松和快乐。

接下来要特别感谢我的女朋友刘志华同学，在学生生涯即将结束的时候有幸认识了你，谢谢你陪我走过撰写论文的那段时光，回想那段一起呆在图书馆的日子，总是听到你对我说“今天写了多少字？接下来打算怎么做？”时刻敲响警钟提醒我时间有限，没有你的督促和鼓励，没有你的宽容和帮助，我的论文不可能完成的那么快。

感谢我的家人，感谢我的父母和两个妹妹，特别要感谢我的大妹妹。博士学习期间，家里发生了太多的事，如果不是你在家照顾家人，我也不可能安心地学习，更不可能顺利度过我的博士生涯，在此向我的家人表示感谢！三十年来，我收获的太多，没有你们无私的爱，不可能有我的今天。

最后，衷心感谢给我论文提出宝贵意见和百忙中参加论文评审、答辩工作的各位老师和专家。

**徐军委**

二〇一三年三月三十日



附表

## 附表

附表1 我国历年工业分行业终端能源消费量 单位：万吨

工业分行业	终端能源消费量（万吨标煤）													
	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997
工业	155933.09	153098.71	145707.08	138038.12	128124.48	118198.82	107158.02	90462.15	77174.27	73324.56	72149.78	71129.87	69197.91	68457.25
（一）采掘业	11222.77	11037.90	11275.59	10187.0	9416.68	9159.90	8953.96	7649.49	6781.59	6505.12	6261.59	5971.45	5796.90	5646.93
煤炭开采和洗选业	6004.88	6148.93	6051.97	5650.04	5129.20	5061.30	5034.84	3256.66	2723.34	2615.32	2578.01	2626.81	2745.89	2412.70
石油和天然气开采业	3120.34	2975.46	3318.85	2732.34	2641.49	2589.40	2582.15	3017.81	2924.61	2832.20	2651.45	2394.07	2066.72	2220.68
黑色金属矿采选业	856.81	662.78	736.40	658.44	572.68	500.84	394.41	326.98	255.41	216.23	208.90	195.56	218.59	216.98
有色金属矿采选业	445.09	395.14	396.37	379.70	343.22	320.11	309.85	294.35	239.96	223.09	214.10	188.93	199.07	235.06
非金属矿采选业	711.05	757.84	701.29	719.51	681.30	650.69	604.16	595.54	497.79	470.53	451.25	419.53	379.37	372.36
其他采矿业	84.60	97.74	70.71	46.97	48.79	37.56	28.54	158.14	140.48	147.76	157.88	146.54	187.25	189.14
（二）制造业	137513.98	135028.87	127854.76	121029.68	111928.30	102779.19	92159.35	77059.43	65441.99	62237.95	61250.49	60456.31	58919.84	58376.12
农副食品加工业	1770.95	1961.30	1930.27	1766.84	1654.50	1596.38	1579.35	1365.20	1391.04	1279.08	1268.53	1300.13	1442.28	1394.23
食品制造业	1115.57	1164.38	1130.32	1062.23	1030.40	968.32	860.89	756.38	818.81	773.99	767.68	834.81	770.45	755.34
饮料制造业	863.78	914.21	892.12	847.84	852.77	797.58	792.29	691.54	655.48	616.16	630.27	695.96	717.66	616.84
烟草制品业	138.41	144.78	147.56	164.37	173.48	171.65	186.92	230.02	229.64	223.76	214.85	261.09	189.35	194.50

纺织业	3666.21	3684.07	3763.82	3836.80	3573.74	3211.82	3058.60	2486.57	2220.73	2006.22	1950.34	1998.99	1979.47	2024.73
纺织服装、鞋、帽制造业	448.03	436.26	442.82	428.73	406.05	369.20	330.05	277.61	249.63	231.56	217.25	231.53	224.59	168.71
皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业	215.64	222.49	223.98	222.46	214.97	196.16	190.42	163.11	146.11	135.41	131.51	147.65	137.88	104.10
木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业	615.29	653.88	605.89	558.83	546.77	507.28	466.23	360.89	292.95	278.91	263.36	285.80	261.38	253.64
家具制造业	122.11	110.10	107.35	86.31	83.82	76.90	68.62	85.71	73.74	72.72	66.41	75.60	57.16	87.05
造纸及纸制品业	2847.16	2961.10	2859.49	2559.68	2645.96	2517.47	2450.38	1914.78	1831.51	1587.84	1578.66	1493.69	1476.00	1428.87
印刷业和记录媒介的复制	202.53	186.16	184.58	161.41	151.10	140.61	164.80	196.88	134.19	130.14	120.78	119.57	105.75	94.73
文教体育用品制造业	116.21	116.60	119.07	108.12	103.68	100.67	100.44	85.38	88.06	76.69	67.97	65.32	87.80	44.85
石油加工、炼焦及核燃料加工业	11713.78	11454.55	10331.06	10523.26	9631.86	9551.04	9307.41	7619.22	6793.78	6406.20	6320.97	5864.53	5768.10	5251.35
化学原料及化学制品制造业	22922.77	22053.65	22196.37	21452.12	19635.70	17708.65	16410.00	14518.47	12186.37	10919.26	10803.55	10300.44	11006.28	11587.40
医药制造业	975.53	911.87	915.98	836.89	840.90	802.08	773.38	818.25	722.86	687.03	657.89	702.92	629.62	583.93
化学纤维制造业	826.74	819.98	828.86	902.31	843.51	785.83	759.89	1007.40	1357.24	1262.85	1290.79	1188.47	1121.28	993.84
橡胶制品业	806.56	762.39	753.67	714.07	696.61	647.83	589.54	508.65	458.95	448.37	417.91	469.50	451.10	407.68
塑料制品业	1045.87	955.08	933.14	808.47	793.43	744.49	643.26	456.89	396.63	390.03	378.47	367.55	361.84	389.07
非金属矿物制品业	22837.96	22542.65	21297.07	18959.77	18774.97	18027.13	17650.28	13049.04	10556.70	11203.37	11760.69	11693.94	10812.78	10793.48
黑色金属冶炼及压延加工业	47338.72	47572.24	43504.33	41530.29	37266.15	33152.52	25896.35	21657.68	16961.74	16452.23	15514.31	15291.43	14752.76	14743.63
有色金属冶炼及压延加工业	6503.03	5996.66	5784.38	5398.32	4549.07	3921.45	3533.75	3108.70	2545.06	2211.11	2164.60	2130.94	1938.08	1796.71
金属制品业	1737.33	1521.20	1489.99	1354.93	1253.20	1108.42	1027.97	927.41	880.51	771.54	694.18	711.36	663.35	628.61
通用设备制造业	2041.53	1953.03	1714.49	1640.51	1495.67	1341.39	1116.44	1021.65	935.43	857.94	817.31	923.78	973.84	1085.40



附表

专用设备制造业	1209.93	1119.64	1073.42	1050.94	940.95	876.39	852.75	715.00	598.57	589.34	598.12	655.20	622.42	652.86
交通运输设备制造业	2172.39	1853.59	1709.77	1517.42	1429.41	1320.22	1337.79	1073.83	1112.23	994.72	930.89	989.40	902.30	909.67
电气机械及器材制造业	1114.24	976.74	931.20	791.90	702.81	641.43	620.32	526.21	465.04	398.89	400.61	423.33	407.16	415.27
通信设备、计算机及其他电子设备制造业	1205.30	1071.13	1071.55	927.51	829.22	721.95	646.31	549.12	461.81	388.50	359.75	341.55	275.06	273.37
仪器仪表及文化、办公用机械制造业	177.58	151.29	143.93	124.77	113.29	98.78	93.56	124.63	101.47	91.13	88.17	96.34	81.84	73.24
工艺品及其他制造业	713.98	721.50	735.57	666.42	668.58	655.85	631.79	747.59	775.70	752.95	774.68	795.47	702.27	623.00
废弃资源和废旧材料回收加工业	48.85	36.38	32.71	26.16	25.76	19.71	19.55	15.62						
(三) 电力、煤气及水生产和供应业	<b>7196.34</b>	<b>7031.94</b>	<b>6576.73</b>	<b>6821.44</b>	<b>6779.50</b>	<b>6259.73</b>	<b>6044.71</b>	<b>5753.24</b>	<b>4950.70</b>	<b>4581.49</b>	<b>4637.70</b>	<b>4702.11</b>	<b>4481.18</b>	<b>4434.20</b>
电力、热力的生产和供应业	6487.91	6349.98	5823.67	6065.22	6066.53	5583.89	5362.67	5141.58	4384.59	3989.17	4060.92	4110.04	4072.73	4002.22
燃气生产和供应业	314.18	328.09	419.89	446.40	421.24	406.02	423.91	397.02	355.12	372.33	357.08	369.91	219.95	248.87
水的生产和供应业	394.25	353.88	333.17	309.81	291.73	269.81	258.13	214.64	210.99	219.99	219.71	222.15	188.50	183.10



## 在学期间参加的科研项目和发表的学术论文

### 作者简介

**徐军委**，男（1982—），2006年7月毕业于中国人民解放军信息工程大学信息工程学院，获理学学士学位；2010年4月毕业于辽宁科技大学理学院，获理学硕士学位；2010年9月起在中国矿业大学（北京）管理学院攻读博士学位，专业为管理科学与工程，研究方向为管理工程。

### 参加的科研项目情况：

- （1）科技支撑引领新疆跨越发展战略研究——新疆能源产业发展战略与技术路线图，科技部课题（已结题），主要研究人员
- （2）煤炭工业“十二五”经济政策研究，国家能源局项目（已结题），主要研究人员
- （3）“十二五”能源供需总量和结构分析及系统优化研究，国家能源局项目（已结题），主要研究人员，获教育部科技进步二等奖（个人排名第六）
- （4）山西煤销集团长治公司2011-2020年中长期发展战略规划（已结题），主要研究人员
- （5）河南煤化集团煤炭产业（2011-2020）战略规划研究（已结题），主要研究人员
- （6）矿政管理基础理论与技术方法研究（煤炭），地调局项目（已结题），主要研究人员
- （7）低碳时代下我国能源预测研究和优化路径选择（滚动课题），中央高校专项基金项目（研究生专项）；年度滚动课题，项目编号：2010YG02，项目的申请人和主要研究人员
- （8）义马煤业集团股份有限公司2011-2013年发展战略规划（已结题），主要负责人
- （9）晋东南煤电基地战略规划及实施方案研究（已结题），主要研究人员
- （10）陕西煤业化工集团神南产业发展有限公司“十二五”发展战略规划（已结题），主要研究人员
- （11）义马煤业集团股份有限公司2012-2014年发展战略规划（已结题），主要负责人
- （12）中俄煤炭领域合作战略研究，国家能源局项目，主要研究人员

### 学术论文发表情况：

- （1）Li Jie Wang, Jun Wei Xu, Pei Qin, Research on China's Energy Demand Forecasting Based on Grey System Theory, Advanced Materials Research, v 524-527, pp.2958-2961, 2012(EI检索)
- （2）徐军委, 刘志华. 基于灰色系统理论的我国能源结构预测及优化研究[J], 工业安全与环保（已录用，拟在该杂志2013年第5期发表）
- （3）徐军委, 能源需求预测模型研究概述, 中央基本科研业务费项目论文集2011
- （4）徐军委, 王立杰. 新疆煤炭产业发展现状分析和对策研究, 中央基本科研业务费项目论文集2012
- （5）刘正伟, 徐军委. 基于组合模型的我国能源消费结构优化调整[J], 中国安全生产科学技术（已录用）