

- 国家自然科学基金课题“智能电网中适应不稳定大规模清洁能源发电的联合智能调度管理理论”（71071052）
- 国务院发展研究中心课题“中国工业低碳和绿色增长——基于电力行业的研究”
- 中央高校基本科研业务费专项资金课题“发电行业低碳发展路径及其成本效益研究”（11MR22）

基于低碳经济的发电行业 节能减排路径研究

宋晓华 牛东晓 著

*Jiyu Ditan Jingji De Fadian Hangye
Jieneng Jianpai Lujing Yanjiu*



煤炭工业出版社

013025966

F426.61

47

基于低碳经济的发电行业 节能减排路径研究

宋晓华 牛东晓 著



煤炭工业出版社

· 北 京 ·



北航

C1632925

F426.61
47

图书在版编目 (CIP) 数据

基于低碳经济的发电行业节能减排路径研究 / 宋晓华,
牛东晓著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2012

ISBN 978-7-5020-4141-0

I. ①基… II. ①宋… ②牛… III. ①电力工业—节
能—研究—中国 IV. ①F426.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 260525 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 9³/₄
字数 157 千字

2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷
社内编号 6964 定价 26.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

前 言

在全球气候变暖、能源短缺、污染日益严重的国际背景下，发展以低能耗、低排放为标志的低碳经济，实现可持续发展，正成为世界各国经济发展的共同选择。低碳经济是中国面临的新选择、新机遇、新挑战，是改善生态环境、推动经济发展方式转变的发展模式。发电行业作为能源消耗量最多、二氧化碳排放量最大的部门之一，其未来发展路径直接影响我国低碳经济的发展效果。本书在前人研究基础上，对基于低碳经济的发电行业节能减排路径做了较为系统的研究。

首先，全面回顾了我国发电行业十年来发展概况、节能减排成果与存在的问题，分析了节能减排的潜力，明确了基于低碳经济的发电行业节能减排路径研究的现实起点。

其次，在对低碳经济背景下电力需求预测特点和影响因素分析的基础上，建立了基于蛙跳算法优化的回归分析、蛙跳改进支持向量机、改进灰色预测的组合预测模型，并利用该模型进行了实证分析，预测了2012年至2020年电力需求量。该预测是规划低碳经济下发电行业节能减排路径最重要的数据基础。

再次，研究了低碳经济下发电行业节能减排的两条路径：低碳电源结构优化路径和化石能源发电低碳技术创新路径。其中第一条路径是解决发电行业低碳、节能减排的根本，因此我们对此路径做了重点研究，在对低碳电源结构规划原则分析的基础上，建立了基于多目标决策的低碳电源结构优化模型，并利用该模型进行了实证分析，量化分析了我国2012年至2020年发电行业优化后的电源结构、投入成本、二氧化碳减排贡献以及其他污染物减排等结果。第二条路径解决了化石能源发电的低碳和节能减排问题，分析了低碳创新技术的作用、发展障碍和发展规划，并分析了2012年至2020年各类创新技术的实施进度。

另外，从行业监管角度研究了低碳经济下发电行业节能减排的评价体系，目的是帮助行业监管部门监督发电行业低碳发展和节能减排路径实现的程度和效果。因此，我们构建了低碳经济下节能减排评价指标体系，建立了基于改进密切值法的综合评价模型，并利用该模型对华东区域的发电行业在2006年至2010年期间低碳、节能减排效果作了实证评价和研究。

最后,提出了一系列保障发电行业实现低碳发展和节能减排的政策建议,为保障发电行业节能减排路径实现提供了宏观助力。

本书主要创新点如下:

(1) 建立了基于低碳经济的蛙跳算法优化的电力需求组合预测模型。该模型将单位 GDP 电耗作为影响因素引入模型,选择回归分析、蛙跳改进的支持向量机、改进灰色预测 3 种方法进行组合,并利用蛙跳算法优化组合权重。该模型更符合低碳发展、节能减排目标,预测精度更高,为低碳经济下发电行业节能减排路径规划奠定了良好的研究基础。

(2) 提出了基于低碳经济的发电行业节能减排的两条路径,分别为低碳电源结构优化路径和化石能源发电低碳技术创新路径。其中,电源结构优化研究利用多目标决策方法对低碳电源结构进行优化分析,将二氧化碳排放量最少和总成本最低作为目标函数,以电力需求、备用容量、污染物排放、可再生能源最大装机容量为约束条件进行电源结构优化。该优化结果是既考虑二氧化碳减排、又考虑成本效益的综合最优。

(3) 建立了低碳经济下发电行业节能减排效果的评价指标体系。该评价指标体系引入多个低碳、节能减排相关指标,并选用改进密切值法构建综合评价模型。

(4) 提出了保障基于低碳经济发电行业节能减排路径实现的政策建议。这些政策建议主要包括健全低碳经济下发电行业节能减排的法律法规体系、完善低碳经济下发电行业节能减排的经济政策、构建低碳经济下发电行业节能减排的市场机制、加强低碳经济下发电行业节能减排的监管工作 4 方面的内容。

本书依托国家自然科学基金课题“智能电网中适应不稳定大规模清洁能源发电的联合智能调度管理理论研究”(71071052)、国务院发展研究中心课题“中国工业低碳和绿色增长——基于电力行业的研究”、中央高校基本科研业务费专项资金课题“发电行业低碳发展路径及其成本效益研究”(11MR22)的研究成果,是在这些研究成果基础上整理编写而成的。本书在写作过程中得到了相关委托单位的大力支持,在此表示诚挚感谢!

本书的完成有赖于许多老师和学生的帮助,刘达、牟岚、李甫、祖丕娥、陈灵青、叶彩琴、刘金鹏、洪悦等在数据搜集、整理、加工及文字处理方面做了很多工作,衷心感谢他们的帮助和支持!由于作者水平和时间有限,书中不妥之处与疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

2012 年 6 月

目	次
1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外文献研究综述	4
1.3 主要内容、研究方法与创新点	10
2 基于低碳经济的发电行业节能减排基本理论	15
2.1 低碳经济相关理论	15
2.2 节能减排相关理论	17
2.3 产业发展相关理论	18
2.4 基于低碳经济的发电行业节能减排路径的基本内涵	19
2.5 本章小结	21
3 发电行业节能减排现状及潜力分析	22
3.1 发电行业发展及其与国民经济发展关系	22
3.2 电源结构现状分析	24
3.3 发电行业节能减排现状分析	28
3.4 发电行业节能减排潜力分析	37
3.5 本章小结	38
4 低碳经济背景下电力需求预测研究	40
4.1 低碳经济背景下电力需求预测影响因素分析	40
4.2 低碳经济背景下电力需求预测方法的选择	44
4.3 低碳经济背景下电力需求组合预测模型构建	51
4.4 低碳经济背景下电力需求组合预测实证分析	56

4.5	本章小结	65
5	低碳经济下发电行业节能减排路径规划	66
5.1	低碳经济下发电行业节能减排路径规划概述	66
5.2	低碳电源结构优化路径的理论研究	69
5.3	低碳电源结构优化路径的实证研究	82
5.4	低碳电源结构优化路径的实施	91
5.5	化石能源发电低碳技术创新路径研究	97
5.6	本章小结	103
6	低碳经济下发电行业节能减排评价体系研究	105
6.1	低碳经济下发电行业节能减排评价的意义	105
6.2	低碳经济下发电行业节能减排影响因素分析	106
6.3	低碳经济下发电行业节能减排评价体系	112
6.4	低碳经济下发电行业节能减排评价实证研究	123
6.5	本章小结	127
7	保障低碳经济下发电行业节能减排路径实现的政策建议	128
7.1	健全低碳经济下发电行业节能减排的法律法规	128
7.2	完善低碳经济下发电行业节能减排的经济政策	130
7.3	改进低碳经济下发电行业节能减排的市场机制	136
7.4	加强低碳经济下发电行业节能减排的监管工作	138
7.5	本章小结	140
8	结论与展望	141
8.1	结论	141
8.2	展望	142
	参考文献	144

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

气候变暖已经成为 21 世纪人类面临的最严峻的挑战之一。全球气候变暖导致冰川融化、海平面上升、自然灾害频发，将深度影响农业安全、生态安全、公共卫生安全和能源安全等，直接威胁人类的生存和发展。人类活动所排放温室气体的不断增加是引发全球气候变暖的主要原因之一。目前已经发现的大气中能产生温室效应的气体近 30 多种，其中二氧化碳起重要的作用。据统计，在温室气体引发的全球气候变暖效应中，二氧化碳的作用高达 77%。因此，减少二氧化碳的排放，是一个亟待解决的重要问题。

面对挑战，联合国与世界各国政府相继行动起来。1992 年 9 月，世界各国政府首脑在联合国环境与发展会议上制定的《联合国气候变化框架公约》（以下简称《公约》），是世界上第一个关于控制温室气体排放、遏制全球变暖的国际公约。1997 年 12 月，联合国气候变化框架公约三次会议制定的《京都议定书》，对减排温室气体的种类、主要发达国家的减排时间表和额度等作出了具体规定。目前已有 194 个国家签署了《联合国气候变化框架公约》，184 个国家签署了《京都议定书》。世界各国在经历了 2007 年 12 月联合国气候大会制定的“巴厘路线图”（确定了世界各国落实《公约》的具体领域）、2009 年 12 月哥本哈根会议（旨在商讨责任共担及《京都议定书》一期承诺到期后的后续方案）、2010 年 10 月天津气候峰会、2010 年 11 月坎昆世界气候大会以及 2011 年 11 月德班会议之后，目前面临的核心问题是如何落实《京都议定书》第二承诺期，并启动旨在帮助最不发达国家应对气候变化的绿色气候基金。各国对低碳发展都制定了自己的发展目标。英国于 2008 年颁布实施了《气候变化法案》，成为全球首个为温室气体减排目标立法的国家。按照该法律，英国在 2050 年的温室气体减排量设定为 8%。日本承诺 2008—2012 年把

温室气体排放量在 1990 年的基础上降低 6%，并采取有力措施推动能源和环境技术的发展。欧盟计划到 2020 年将温室气体排放量在 1990 年的基础上减少 20% ~ 30%，到 2050 年减排 60% ~ 80%，等等。

各国采取措施应对气候问题的背后，实质上反映的是能源发展战略和经济竞争地位的问题。因此，各国政府面对气候问题时既有自身的积极行动，也有相互之间的矛盾和纷争。但无论怎样，气候变化没有国界，任何国家都不可能独善其身。

作为当今世界 CO₂ 排放量最大的国家之一，我国政府以长远的战略眼光高度重视全球气候变暖问题。我国先后于 1992 年、1997 年正式签署《框架公约》与《京都议定书》，在 2009 年 12 月的哥本哈根气候变化峰会上郑重宣布到 2020 年单位 GDP 的二氧化碳排放比 2005 年下降 40% ~ 45%，非化石能源占一次能源的比重达到 15% 左右，并将减排目标作为约束性指标纳入国民经济和社会发展的中长期规划之中。各种统计数据显示我国正在郑重履行承诺。一方面要看到我国在大力发展经济的背景下，这样大规模降低二氧化碳排放，需要付出艰苦卓绝的努力；但另一方面也要看到，我国发展低碳经济对于转变经济发展方式、实现结构调整、提升技术创新能力、增强可持续发展能力具有十分重要的战略意义。展望未来，我国将从发展低碳经济、转变经济发展模式中获益。全球向低碳经济转型，为我国这一发展中大国提供了新的增长机会和实现跨越发展的历史机遇。我国有可能成为全球快速增长的低碳技术市场的供应者，并占领全球竞争的制高点。

低碳经济不是一个简单的技术问题或经济问题，它涉及政治、社会、环境、国际等多个问题。任何一个国家和地区单独发展低碳经济都不能实现全球温室气体排放的减少。这需要全球所有国家和地区的共同参与。在我国，发电行业作为国民经济中二氧化碳排放量最大的部门之一，占碳总排放量 38.76%。我国电力生产所利用的能源以煤炭为主，煤电占电源结构的比重达 70% 以上，生产单位电能的二氧化碳排放强度远高于全球发达国家的平均水平。同时，由于发电机组具有较长的服役年限，所以发电行业具有很强的“碳锁定”效应，即未来相当长一段时间内电力行业的二氧化碳排放将被当前的电源结构所“锁定”。可见，在低碳经济背景下，如何确保发电行业在持续稳定发展的前提下实现节能减排，是发电行业当前所面临的重要问题。

鉴于发电行业在我国低碳经济发展、节能减排工作中具有举足轻重的地

位,国家非常关注该问题的研究。国务院发展研究中心专门委托我们课题组对此问题进行研究并提交报告,目的是让我们提出低碳经济背景下电力行业发展规划建议,为国务院制定相关政策提供参考。本书在此研究报告基础上进行了更加深入和系统的研究与分析,提出了基于低碳经济的发电行业节能减排发展路径。

1.1.2 研究意义

本书的研究内容具有重要意义。

第一,全面规划了低碳经济下发电行业节能减排的路径,对改变我国当前煤炭依存度过高的电源结构,实现能源结构多元化,对实现我国政府2009年在丹麦举行的哥本哈根会议上的承诺,进而实现我国低碳发展意义重大。

第二,建立了低碳经济背景下电力需求预测模型,并按GDP发展的不同情景预测了我国2012年至2020年的电力需求量,有利于相关部门控制发电行业未来低碳发展、节能发展的规模和速度,对实现发电行业可持续发展具有重要意义。

第三,构建了基于低碳经济发电行业节能减排的两条路径——“低碳电源结构优化路径”和“化石能源发电低碳技术创新路径”。这两条路径有利于实现发电行业低碳经济下的节能减排目标。同时,本书通过实证研究量化分析了发电行业对碳减排作出的具体贡献,为我国政府对发电行业下达碳减排目标,制定相应保障措施提供了依据。

第四,提出了低碳经济下发电行业节能减排评价体系,为我国发电行业投资新电源建设和低碳创新项目实施提供了全新的评价指标和评价方法,有利于保障发电行业低碳、节能减排路径规划的实现,为发电行业监管提供了依据和标准。

第五,提出了保障低碳经济下发电行业节能减排路径实现的政策建议和措施,对发电行业顺利实现低碳和节能减排路径进行了有力推动。

目前,我国已经有针对低碳经济下电力行业发展方面的相关研究,但针对发电行业在低碳经济背景下节能减排贡献方面的研究还不是很多。本书充分借鉴和吸收专家、学者的研究成果,对发电行业统筹优化电源结构,加大低碳技术创新力度等工作提出了一整套方案,从而为实现我国发电行业的低碳发展和节能减排发展提供了参考。

1.2 国内外文献研究综述

1.2.1 发电行业低碳发展研究

近几年各国政府和相关专家都试图寻求低碳经济背景下能源和发电行业的最优发展路径。

英国将低碳发展目标体现在电力系统的战略规划中,积极致力于多种能源混合所产生的排放与单一燃料产生的排放的比较研究。英国的研究表明,低碳电力技术依赖于多种能源的混合发电。Michael Grubb 等人探索低碳目标和电力系统之间的关系,认为燃料组合的多样性代表了安全性和鲁棒性。研究结果显示,英国电源的多样性与长期的低碳目标是一致的,并简要讨论了相应政策工具的多样性及其局限性。Neil Strachan 等人采用新的混合 MARKAL - MACRO (M - M) 模型,认为英国在较长时间内减少二氧化碳排放量是可行的。但是,该研究忽略了减少二氧化碳排放对英国经济的竞争力和过渡性的影响。Kannan 通过 MARKAL 模型分析了英国电力部门在减少碳排放不同情景中的作用,认为英国政府到 2050 年二氧化碳排放量减少 60% 的目标需要通过整个能源系统的转变来实现。Dagoumas 等人利用 E3MG 宏观计量模型采用自下而上的方法,在二氧化碳排放量减少 40%、60% 和 80% 三种情景下,在满足宏观经济发展要求的基础上,分析了为达成碳减排目标可能选取的能源和电力方面的路径,旨在参照国际减灾和八国集团减排目标,为英国设计政治框架,并量化可能实现的贡献。Foxon 等人研究实施可再生能源配额政策,认为电力生产所需能源中有一定比例应来自于可再生能源,并从发电交易权、电力系统规划、低碳电力可靠性等多个角度展开研究。

欧洲除英国外的其他国家也积极开展低碳电力的研究。Anil Markandya 等人认为碳排放信用额度可以推动可再生能源快速发展,并且可以通过诸如商业银行、碳交易所等形式刺激自愿碳信用额度(补偿)市场崛起的方式以达到这一目的,而且会形成一个全球性的系统。Sonia Yeh 等人探讨了低碳燃料标准的实施方案和挑战。Toshihiko Nakata 等人阐述了能源系统模型在低碳社会中的应用,在论文中首先分析了能源系统和低碳社会的关系,然后介绍了太阳能发电、水力发电、风力发电、地热能发电、废物能源发电、煤气化联合循环、流化床燃烧等低碳能源技术状况,并利用 WTE 和能源系统集成模型重点分析了其在电力部门的应用。Patrik Söderholm 等人分析了到 2050 年不同能源

情景下的低碳期货的作用。研究表明欧盟国家利用其在可再生能源和温室气体减排等方面的技术优势,积极推动应对气候变化和温室气体减排的国际合作,力图通过技术转让为欧盟企业进入发展中国家能源环保市场创造条件。

美国虽然在二氧化碳减排方面没有明确的承诺,但是也从未搁置低碳技术和实现低碳发展的研究。John A. Mathews 通过分析 2050 年比 1990 年全球总二氧化碳排放量减少 50% 的建模效果,量化分析了脱碳电力生产的健康收益程度。S. Giblin 等人回顾了美国联邦政府和一些州政府为减少运输部门温室气体排放制定的 LCFS 的主要内容,探讨了能源经济能效和碳排放强度的度量对电力部门的影响,并以加利福尼亚州为例做了实证研究。Asbiorn Torvanger 等人提出了通过将经济模型应用于 CCS 和可再生能源技术的方法,探索成本最低的替代品满足碳减排目标的经验曲线,并给出了各种经济和政治的相关政策。A. J. Simon 等人估算了从空气中捕获二氧化碳的成本。James Nelson 等人认为电力生产减少碳排放是减少温室气体排放工作的核心,并使用混合整数线性规划模型分析了间歇性可再生能源资源开发在各项政策下的北美西部的产能扩张方案。研究证明,如果没有新的政策,美国到 2030 年将无法实现碳减排目标;如果有政策支持,美国可以通过使用现有的发电技术的不同组合,在电力成本增加 20% 的前提下实现一定的减排目标。

日本很注重新型能源的开发和研究,并从可再生发电、传统化石电源的低碳化改造、电能传输环节的低碳化技术(超导输电、电能储存、分布式电源等)与电能消费终端的低碳化技术(低碳燃料、低碳电器、智能电表等)方面进行研究,寻找适合低碳发展的新型发电能源。但是日本有关低碳的研究更多地集中在交通方面,电力方面内容相对较少。

João Lampreia 等人从低碳技术发展的角度,分析了巴西在未来几十年里减少碳密集排放的发展模式和主要部门,设计了扩大其电力矩阵和整体能源部门的发展方案,同时也分析了巴西能源来源多样化的发展瓶颈。

Wijayatunga 调查了碳排放和能源税征收对经济的影响,在对斯里兰卡发电部门的目标进行研究的基础上分析了混合燃料结构和最终需求互动效应下的二氧化碳排放量。

我国学者也做了相关研究。康重庆、陈启鑫和夏清从宏观与微观层面全面地分析了在低碳经济中电力行业所面临的新形势与呈现的新特点,剖析了“低碳电力”这一全新领域的发展方向,对低碳电力技术的研究与运用进行了

展望,阐述了实施低碳电力发展战略所面临的主要挑战与亟待解决的问题,并建立了低碳电力技术的整体研究框架。路石俊、杨淑霞和林艳婷概括性地阐述了我国电力行业二氧化碳排放状况和实行低碳电力的必要性,提出了适合我国低碳电力发展的策略:一是适时开征“二氧化碳税”;二是改变电源结构;三是合理规划电网分布;四是将低碳约束加入电网调度;五是增加特高压、数字化变电站建设;六是建立清洁发展机制(CDM)管理。黄海燕、雷磊、栾维新等人探讨了在低碳背景下如何增强公众对沿海风力发电合理布局的意识和关注度,从而推动风力发电在我国沿海地区的合理布局与发展的问題。蒋宏、张东明和林少平阐述了低碳经济提出的背景和内涵,介绍了中国低碳经济发展现状与面临的形势,分析了发电行业在低碳经济中的地位以及发展趋势,最后提出了低碳经济时代发电行业应树立低碳经济理念,统筹规划电力结构,优化能源结构,广泛开展国际合作,吸取国外发展低碳经济的成功经验和技術,加大低碳技术创新力度等观点。殷红军、郭永凯认为我国要树立以大力发展新能源引领发电集团向低碳企业转型的思路,提升新能源发电装机的比重,培育以新能源为特色的竞争力,逐步改善产业结构,增强企业盈利能力和可持续发展能力。高波、张国兴和郭菊娥认为低碳发电对于我国改善能源结构,保障能源安全,实现经济社会可持续发展有着重要的意义,同时,考虑到电力项目的运营特点,他们构建了基于暂停期权的低碳发电项目投资价值模型及投资临界值计算模型,测算了我国现阶段秸秆发电项目的投资临界值及其对投资成本、可变成本、固定成本、政府补贴、需求量以及碳交易价格的敏感性,并针对不同敏感性因素给出了相应的决策建议。王跃锦、薛松、朱晓丽研究了低碳智慧岛分布式能源体系及供能模式,在此基础上构建了基于混合整数线性规划(MILP)和人工神经网络(ANN)相结合的分布式电源发电管理模型,并通过算例对比分析了基于MILP-ANN模型和基于MILP模型的计算结果,验证了所提出模型的合理性和先进性。

1.2.2 发电行业节能减排研究

发电行业一直是节能减排的重点研究对象。国内外均有相关研究,研究主要集中在电力行业节能减排环境效益与潜力、节能减排途径和措施以及实施节能减排的风险3个方面。魏学好、周浩采用环境经济学理论,参考中国排污总量收费标准和美国环境价值标准,根据火电行业污染物环境价值标准对中国火电行业减排的环境价值标准进行了估算,为我国火电行业节能减排环境效益的

计算提供了依据。张旭、孙根年通过建立电力工业能耗和大气污染、水耗和水环境污染随人均 GDP 变化的环境学习曲线,分析了不同时段中国电力工业的环境负荷和节能减排潜力,发现各指标随着人均 GDP 的增长而衰减。Joshua M. Pearce 等人分析了客户收费的分布、时间效率,并将其折合成发电固定成本,分析了分布式发电及客户选择的节能减排效果。姜海洋构建了市场条件下煤炭商、发电商、供电企业三方协调发展价格联动模型,建立了 ShaPley 利益分配模型,还将发电商的运行成本、备用成本和排污成本作为目标函数,在虚拟电厂情景下,建立了发电节能减排优化模型。姜海洋、谭忠富、胡庆辉等人探讨了用户侧虚拟电厂对发电产业节能减排影响分析模型。杨卓、毛应准探讨了减排约束下区域间发电置换组合优化模型,分析了基于节能减排的电力系统短期经济调度,提出了多时间尺度下的短期经济调度模式,构建了 3 种处理节能减排双目标的策略,形成了多种数学模型,并采用改进算法对数学模型进行优化计算,获得最优经济调度策略。

1.2.3 电力需求预测研究

国外电力需求预测的研究始于 20 世纪中期,至今已经拥有一些较为成熟的方法和模型。20 世纪 90 年代初,国外就有文献提出使用贝叶斯方法预测终端电力需求。Julian. I. Silk 等人通过协整和误差修正模型,引入经济和季节因素,对美国居民电力需求进行了短期预测,并与其他预测结果进行对比来证明结果的正确性。Abdul Razak F Al - Faris 运用协整方法研究了海湾国家的电价、可替代能源价格和 GDP 对电力需求的影响。James W. Taylor 基于半小时间隔的电力需求数据,基于引入季节性指数和针对这个新指数的滤波公式的指数平滑模型,进行了短期电力需求预测。Erkan Erdogdu 运用协整检验和 ARMA 模型研究了土耳其的电价、可替代能源价格和 GDP 对电力需求的影响。

我国很多学者也采用了多种方法预测了电力需求量。牛东晓等人系统介绍了包括符合预测经验技术与经典技术、电力负荷趋势外推预测技术、电力负荷回归模型预测技术、电力负荷随机时间序列预测技术、电力负荷灰色预测技术等在内的电力负荷预测技术及其应用。为提高电力负荷预测的准确性,牛东晓等人还尝试着建立了多因素支持向量机、回归分析、神经网络、基于加权最小二乘支持向量机 (LS - SVM)、粒子群以及其他多种组合预测方法,在组合预测中分别通过采用熵值法确定模型评价指标的相对权重和采用方差 - 协方差优选组合预测方法与灰色关联分析确定各单一预测模型在各评价指标下的相对权

重,最终确定了采取组合预测模型中的组合权重等方法进行预测,从而使预测研究更为丰富。

1.2.4 电源规划研究

国外从 20 世纪 60 年代开始,已研究出多种各具特色的商用电源规划优化程序,其中较有代表性的电源规划的优化程序包有 WASP 模型、MIPPS 模型、OGP 模型、EGEAS 模型、MINI 模型、PCS 模型、CERES 模型等。

国内一些机构对电源优化模型也进行了广泛研究。汪拥军、孙东川探讨了在对各种电源类型进行安全性、清洁性、成本性、调峰能力和经济性分析基础上,从市场环境的角度提出了我国应该立足煤电,加大核电开发力度,加大水电、风电等可再生能源发电的开发力度,加快小火电退役,限制或淘汰燃油机组,并在经济发达地区建设抽水蓄能及天然气发电机组,进一步提高系统调峰能力的电源结构调整思路。陈启鑫、康重庆、夏清分析了面向低碳目标的电源规划模式,在揭示各类低碳要素对传统电源规划模式的影响机制与作用原理的基础上,对实施低碳电源规划的关键技术进行了研究。随着系统工程与运筹学的发展和计算机的普及,国内出现了基于可持续发展、环境约束或无背景约束的电源规划优化算法,如层次分析法、遗传算法、目标规划、动态规划法、遗传算法、整数规划、模糊理论、模拟退火和粒子群优化方法。施应玲、刘媛媛运用多目标规划的理论和方法,构建了社会经济与环境协调发展的电源结构优化模型,并运用此模型对 2010 年我国电源结构进行了优化分析。傅毓维、杨莉基于模糊模式识别理论和方法,利用 1995 年到 2004 年的相关数据,对我国电源结构优化进行了评价,为相关决策提供了判断依据。

1.2.5 低碳背景下发电行业评价研究

国外的研究大多基于低碳经济的宏观背景,从国家和区域发展着眼,进行以碳价、碳交易、碳税为主的低碳要素对某一产业和某一类型低碳技术的经济性分析研究。Luis M. Abadie 等人以煤电为例,探讨了采用 CCS 技术的潜在风险,用实例验证在当前《京都议定书》约定的碳价水平下,采用 CCS 技术从财务角度看是不可行的。Ekström Clas 等人对 ECLIPSE 过程模拟器用于燃气轮机联合循环发电系统进行了技术、环境和经济评价,认为不仅技术上可行而且节约能源。Ishan Purohit 对印度的聚光太阳能技术的技术经济评价做了初步尝试,所取得的成果可作为印度太阳能发电技术的评价指标。

国内相关研究也很多,谭忠富、侯建朝、姜海洋等人利用系统理论,建立

了能源可持续利用的系统结构模型,构建了能源可持续利用的指标体系。刘丽珍研究并分析了火电行业清洁生产评价方法及指标体系,通过工程实例,探讨了如何运用清洁生产指标体系,并对其存在的不足及评价过程中可能产生的问题提出了见解。任玉珑、刘宁、刘焕利用 DEA 模型,检验了我国火电行业的电能生产和环境的协调发展效率及其变换趋势,并得出只有在市场化、企业改革和建立现代监管 3 个方面同时取得成效时,我国电力行业的绩效才会得到明显提高的结论。贾海娟、黄显昌和谢永平分析了某电力企业典型的清洁生产措施,并与火电行业清洁生产主要指标进行对比,评价了该企业在火电行业的清洁生产水平,认为其成功的清洁生产措施可以为行业开展清洁生产工作提供经验。陈启鑫、周天睿、康重庆等人建立了适应不同电力调度模式的二氧化碳排放计算模型,采用当前的实际数据与未来的规划方案数据,分析了不同调度模式下国内电力行业的二氧化碳排放轨迹,提出了以机组年发电小时数差异为控制要素的电量分配方法,由此形成不同的调度方案,进而对节能发电调度方案的低碳效益进行了计算与比较。时洋构建了具有结果导向型的定量化电力工业节能减排绩效评价指标体系,建立了基于功能驱动的指标偏好型、方案偏好型的主观评价法与基于差异驱动的整体差异型、局部差异型的客观评价法的组合评价模型。何伟、秦宁、何玘霜等人设计了节能绩效与减排绩效关系图及节能绩效、减排绩效与经济效益协调关系三角图,研究了 1997 年到 2006 年我国的石油、化工和冶金等行业不同的节能减排绩效及其与经济效益的协调性状态和趋势。李爱军把燃煤发电的工程子模型与能源 CGE 模型进行衔接而建立了混合 CGE 模型,通过对我国能源、经济 and 环境的复杂系统的仿真计算,对严格的节能减排政策下我国 2030 年以前的电力需求以及我国发展先进燃煤发电技术的节能量、大气污染物排放和温室气体排放进行了预测。

1.2.6 国内外文献研究评述

从低碳经济背景下发电行业的相关研究成果来看,国外学者侧重研究如何利用模型量化分析多种发电形式对碳减排的作用和效果,其模型以典型能源模型为主;而国内学者更侧重研究发电行业低碳发展的规划思路及政策建议。本书将建立模型研究低碳经济下发电行业节能减排的路径规划及其贡献和效益,为我国规划和监管发电行业未来低碳发展提供依据和建议。

从发电行业节能减排的相关研究成果来看,目前国内外学者主要从用户侧能源选择,煤炭商与发电商、供电企业三方协调发展价格联动,区域间发电置

换3个角度展开研究。虽然有的文献也涉及低碳要素,但不是以低碳发展为研究主体,研究深度尚待加深。本书以低碳经济为大的着眼点,在节能减排中着重研究碳减排问题,角度和内容与以往节能减排研究都有所改变,更符合目前国际和国内的宏观背景和社会形势。

从电力需求预测的相关研究成果来看,该领域的研究方法已经比较成熟。研究方法主要有两大类:一是通过分析影响电力需求的因素,选择回归分析、电力弹性系数、分产业产值单耗、系统动力学等方法进行预测;二是利用电量的历史数据,选择神经网络、生物智能、支持向量机、灰色预测等方法对数据进行拟合或训练,从而达到相对准确预测的效果。第一类方法中的电力需求影响因素以GDP、人口、各产业所需电量为主,很少考虑与节能减排有关的因素。本书所采用的预测方法吸收两类方法的优点:一是在确定需求预测影响因素时除了GDP、人口两个因素外,还选取了GDP单位用电量,以体现低碳和节能减排;二是选择了基于回归分析、改进灰色预测和改进支持向量机的组合预测方法,从而可以达到更高的预测精度。

从电源规划的相关研究成果来看,该领域的研究主要是以成本最低、环境最优、能源可持续发展、电力供需平衡中的某个条件为目标函数做规划,目前尚未发现有既考虑到二氧化碳排放量最少,又考虑到成本相对最低的多目标电源规划研究成果。本书将以碳排放最少和成本最小为目标函数进行低碳电源结构优化。

从低碳背景下发电行业评价相关研究成果来看,这些研究更多的是集中在低碳技术如CCS、新能源发电项目或电厂的经济效益、环境效益、可持续发展等方面的评价。目前尚未发现从行业监管的角度对发电行业建立综合评价体系的成果。本书将从这个角度进行低碳背景下发电行业综合评价研究。

1.3 主要内容、研究方法与创新点

1.3.1 主要研究内容

低碳经济为发电行业的节能减排工作赋予了新的内涵,发电行业应该从改善电源结构、加大化石能源发电减排力度两个角度完成新的节能减排任务。本书以我国在发展低碳经济背景下制定的基本工作任务为目标,以定量分析为主要方法,以发电行业低碳节能减排为主线进行研究。

第一章,介绍了研究背景、研究意义和方法;对发电行业低碳发展研究成