

研究生教材

电力低碳管理模型 及政策评价研究

孙 伟 王敬敏 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

研究生教材

电力低碳管理模型 及政策评价研究

孙 伟 王敬敏 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

作为工业领域最大的二氧化碳 (Carbon Dioxide, CO₂) 排放行业, 电力行业减排潜力巨大。我国电力行业必须转变传统发展模式, 着力构建电力低碳发展模式。本书以电力行业 CO₂ 管理为出发点, 研究国家、产业、省 (区) 及发电端和终端交叉多维度多层次控碳模型, 并提出控制 CO₂ 的有效途径。

本书绪论和第 1 章主要介绍电力低碳研究背景、意义及当前国内外研究现状。第 2 章建立基于量子声优化算法的最小二乘支持向量机 (QHSA-LSSVM) 预测模型, 对电煤消耗量和 CO₂ 排放量进行预测。第 3 章通过扩展 STIRPAT 模型构建电力 CO₂ 排放主导驱动因素识别模型。第 4 章在第 3 章基础上, 搭建电力 CO₂ 排放系统动力学模型, 设计电力行业未来低碳发展情景。第 5 章采用 AP 聚类算法对我国 30 个省 (区) 进行聚类, 再根据 Laspeyres 完全分解模型量化区域 CO₂ 排放差异性驱动因素。第 6 章从终端产业角度进行电力消费碳生产率分解建模。第 7 章通过建立电力低碳发展效果综合评价模型, 对电力行业近年来的低碳发展效果进行综合的客观评价。第 8 章对全书的研究结论进行总结。

本书可供高等院校相关专业师生参考使用, 也可供电力发展决策人员、能源分析研究者、低碳发展研究机构、国家相关行业发展政策制定者、环境保护研究者使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力低碳管理模型及政策评价研究/孙伟, 王敬敏著. —北京: 中国电力出版社, 2017. 7

研究生教材

ISBN 978-7-5198-0802-0

I. ①电… II. ①孙… ②王… III. ①电力系统-节能-研究生-教材 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 128182 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 牛梦洁 (010-63412528)

责任校对: 马 宁

装帧设计: 左 铭

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京教图印刷有限公司

版 次: 2017 年 7 月第一版

印 次: 2017 年 7 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 7.75

字 数: 148 千字

定 价: 28.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换



低碳发展背景下，低碳减排是各国能源产业未来发展的标向。受资源禀赋的影响，煤电为主的电源结构是造成我国电力行业成为能源领域最大 CO_2 排放行业的主要原因，其碳排放占全国排放总量的一半左右。电力行业的绿色低碳发展是兼顾经济、社会、环境，并实现行业自身可持续发展的必由之路。研究电力行业低碳（电力低碳）管理问题对于有效控制电力碳排放，积极应对气候变化行动，实现我国总体节能减排目标具有重要的现实意义。

本书以我国电力低碳管理为出发点，以电力低碳发展与控碳政策评估为研究主线，建立国家、产业、省（区）及发电端和终端交叉多维度多层次控碳模型与低碳路径研究体系，设计低碳管理相关的预测、模式相似性与差异性、主导因素识别、路径设计等系列控碳模型方法，并对不同层级电力行业进行实证分析；根据实证结果提出电力低碳管理的有效政策，并依据模型方法提出的控碳政策给予科学评价，以提高我国电力低碳管理效果，为电力低碳管理重点和控碳政策的制定提供科学依据。

本书共分为 8 章。绪论和第 1 章是对电力低碳研究背景、意义及当前国内外研究现状的介绍。第 2 章针对电力行业面临的环境压力问题，建立基于量子和声搜索算法的最小二乘支持向量机（QHSA-LSSVM）预测模型，并采用该模型对我国电煤消耗量和对应的 CO_2 排放量进行模拟预测，定量的衡量电煤消耗和 CO_2 排放量未来增长趋势，对减碳任务的艰巨性和必要性给出量化依据。第 3 章以基本 STIRPAT 模型为框架，根据电力行业技术特点，将技术因素进行扩展，构建电力 CO_2 排放主导驱动因素识别模型。通过偏最小二乘法（Partial Least Squares, PLS）参数拟合和变量重要性投影变量重要性（Variable Importance in Projection, VIP）计算，识别出解释变量对被解释变量贡献率的大小，同时识别出来的解释变量将作为电力低碳系统动力学模型的部分输入变量，用以设计未来电力低碳发展的可能模式。第 4 章在可扩展的随机性的环境影响评估模型（Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology, STIRPAT）识别电力 CO_2 排放主导驱动因素基础上，考虑政策、碳税、电价、电力技术变化等因素的影响，对输入变量进行扩展，建立电力 CO_2 排放关系图和系统流图，搭建出我国电力 CO_2 排放系统

动力学模型。通过情景分析法，设计电力行业未来低碳发展情景，并计算不同情境下电力 CO₂ 排放总量、电力生产 CO₂ 排放系数和电力消费 CO₂ 排放系数，进行历史和未来发展情况分析，研究结果对电力工业总体、发电侧和消费侧的控碳政策提供参考依据。第 5 章从各省（区）电力 CO₂ 排放特性入手，采用 AP（Affinity Propagation）聚类算法，以电力 CO₂ 排放影响因素为聚类指标，将我国 30 个省（区）进行聚类，对同类省（区）CO₂ 排放的相似性和不同类间的差异性进行分析。再根据拉氏（Laspeyres）完全分解模型量化衡量区域发电 CO₂ 排放系数、发电结构、电耗强度、经济与人口这五个主要因素对各省份电力 CO₂ 排放影响的贡献，并以此提出不同省（区）差异化的低碳发展路径。根据聚类和发展路径分解可以综合得到因地制宜的区域电力低碳发展方向和政策。第 6 章从电力消费角度考虑经济发展和环境资源保护的协调问题，提出电力消费碳生产率概念，并从终端产业角度进行电力消费碳生产率分解建模，以产业结构调整和产业技术进步为主要分析因素，量化计算其沿时间轴对总体电力消费碳生产率的影响变化。分析表明行业电力消费结构优化、电力消费效率的提升、节电服务产业的培育和结构化节能等措施对于提高用电终端电力消费碳生产率具有重要的意义。第 7 章通过建立电力低碳发展效果综合评价模型，对电力行业近年来的低碳发展成效进行综合的客观评价。在构建电力低碳发展效果综合评价指标体系基础上，结合贝叶斯真理血清（Bayesian Truth Serum, BTS）主观赋权法和反熵客观赋权法，对指标进行组合赋权，再采用基于贴近度的密切值法对研究期内电力低碳发展效果进行时间轴方向的综合评价，并根据评估效果对发展方向提出改进性意见。第 8 章对全书的研究结论进行总结。

本书得到国家自然科学基金面上项目“智能电网环境下我国电力行业碳排放控制关键问题研究”（项目批准号：71471061），北京哲学社会科学项目“京津冀产业协同下的能源效率提升策略研究”（项目批准号：15JGB050）和中央高校专项业务经费项目“电力低碳发展路径建模及政策研究”（项目批准号：2016MS128）的支持和资助。

鉴于时间和水平所限，本书难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

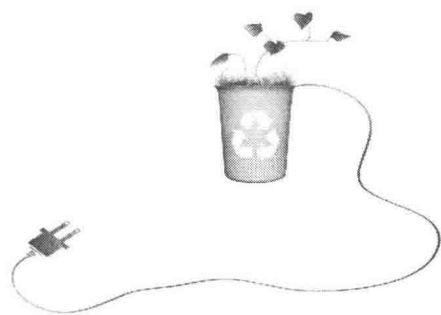
作 者
2016 年 9 月



前言

绪论	1
0.1 研究背景	1
0.2 研究意义	2
0.3 研究思路及本书主要内容	4
第1章 国内外研究进展综述	8
1.1 CO ₂ 排放预测相关研究	8
1.2 低碳发展路径及情景设计相关研究	9
1.3 区域（产业）低碳发展相关研究	11
1.4 低碳评价相关研究	13
第2章 电力行业环境压力预测模型	14
2.1 LSSVM 模型	14
2.2 量子和声基本理论	16
2.3 量子和声搜索的 LSSVM 模型	18
2.4 数据拟合及预测结果分析	19
本章小结	25
第3章 电力 CO ₂ 排放主导驱动因素识别模型	27
3.1 模型相关理论	27
3.2 数据选择及数据特性分析	30
3.3 PLS 拟合及变量重要性分析	32
本章小结	38
第4章 基于系统动力学的电力 CO ₂ 排放情景模拟	39
4.1 研究框架与基本思路	39
4.2 系统动力学基本理论	40

4.3 我国电力 CO ₂ 排放系统动力学模型	41
本章小结	58
第 5 章 区域电力 CO₂ 排放相似性与差异化分析	59
5.1 研究框架与基本思路	59
5.2 AP 聚类原理	59
5.3 基于 Kaya 等式的 Laspeyres 完全分解模型	61
5.4 数据来源	65
5.5 聚类结果及分析	66
5.6 分解结果及分析	69
本章小结	76
第 6 章 终端产业电力消费碳生产率分解模型.....	78
6.1 电力消费碳生产率含义	78
6.2 碳生产率分解模型	79
6.3 数据及分解结果分析	80
6.4 政策启示	86
本章小结	87
第 7 章 电力低碳发展综合评价模型及分析	88
7.1 电力低碳发展评价意义及研究框架	88
7.2 电力低碳发展评价指标体系构建	89
7.3 电力低碳发展综合评价模型	90
7.4 低碳电力发展综合评价实证	94
本章小结	100
第 8 章 结论与展望.....	101
8.1 结论	101
8.2 展望	102
附录	103
参考文献	107



绪论

0.1 研究背景

0.1.1 全球温室效应与低碳发展

大量化石燃料的消耗,引起全球温室气体 (Greenhouse Gas, GHG) 排放增加,其中二氧化碳 (Carbon Dioxide, CO_2) 是造成温室效应,并诱发全球气候系统中诸多变化的主要原因^[1]。自 20 世纪 90 年代开始,以全球变暖为主要特征的气候变化在国际社会受到越来越多的关注^[2,3]。面对全球变暖,人类对人与自然、人与社会、人与人和谐关系进行理性认知后,开始在经济增长与福利改进的关系、经济发展与环境保护的关系中积极寻求一种理性权衡,提出了现代低碳经济的发展理念。低碳经济的概念源于 2003 年英国的《能源白皮书》(UK Government, 2003)——Our Energy Future: Creating a Low Carbon Economy^[4],其所引领的未来政策方向引起了世界各国广泛关注,日本、欧盟、加拿大等也纷纷提出了迈向低碳经济转型的政策方案^[5-7]。20 世纪 90 年代,国际社会为了应对气候变化,先后制订了《联合国气候变化框架公约》(1992 年)、《京都议定书》(1997 年)、“巴厘岛路线图”(2007 年)、《哥本哈根协议》(2009 年)等国际性条约和文件,推动应对气候变化进程不断前行。

0.1.2 我国低碳发展责任

作为世界上最大的发展中国家,我国自 20 世纪 70 年代以来,经济保持快速发展,能源需求不断增加。20 世纪 90 年代,我国化石能源消费总量超过美国,成为世界第一大消费国。现在,我国 CO_2 排放量超过美国,成为全球最大的 CO_2 排放国家^[8,9]。现阶段我国仍然处于快速工业化和城镇化过程中,经济的快速增长必然引发能源消费需求和能源消费的快速增长,因而导致 CO_2 排放增速加快,环境污染问题日益突出^[10]。按照常规 (Business as usual, BAU) 模式发展,我国 2030 年能源消耗将达到 55.3 亿吨, CO_2 排放达到 117 亿吨,到 2050 年能源消费预计为 66.6 亿吨, CO_2 排放将达到 128 亿吨^[11]。党和政府高度重视气候变化问题,在联合国气候峰会和 G20 领导人会议等许多重要场合,均表

达了对控制 GHG 排放的支持与合作意愿。哥本哈根会议前夕,我国宣布 2020 年单位国内生产总值 CO₂ 排放比 2005 年下降 40%~45% 的目标^[12]。我国在控制 GHG 排放方面始终坚持《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》基本框架,并在国务院常务会议应对气候变化工作中,将控制温室气体排放的行动目标作为约束性指标与经济社会发展联系起来^[13,14]。我国实现经济可持续发展的关键问题是如何应对国际气候变化和承担温室气体的减排责任^[15]。

0.1.3 我国电力低碳发展责任

在我国绿色低碳发展的大方向下,能源消费和 CO₂ 排放重点行业应该承担应有的责任。我国主要能源消耗行业之一是电力行业,电力是国民经济发展和社会进步的重要支柱。2005~2013 年期间,全社会用电量从 24773 亿千瓦时增长到 53223 亿千瓦时,平均增长率为 14.35%;为了适应快速增长的用电需求,发电装机容量从 51718.48 万千瓦增长到 124738 万千瓦^[16],平均增速达到 17.65%。在短期之内,我国经济发展仍将保持一定的速度,电力消费对经济发展和社会进步的驱动作用仍将存在,在整体经济和社会用电量增长的趋势下,我国火力发电依然是电力行业的主力电源。从装机容量来看:2005 年火电装机容量为 3.82 亿千瓦,占装机总容量的 74.9%;2013 年火电装机容量为 8.6 亿千瓦,仍占 68.8%。发电量也呈现类似态势:2005 年发电总量为 24747.41 亿千瓦时,其中火力发电量 20179.73 亿千瓦时,占发电总量的 81.54%;2013 年发电总量达到 53474.16 亿千瓦时,火力发电量 41900 亿千瓦时,占发电总量的 78.36%。

火电装机容量比重和发电比重呈现相对稳定的态势,高碳型的电源结构造成电力行业成为 CO₂ 排放的主要行业。此情形主要由我国资源禀赋条件决定,作为世界最大的煤炭生产及消费国,我国一次能源结构中煤炭约占 70%~80%,全国煤炭产量的 1/2 用于火力发电^[17,18]。电力行业排放的 CO₂ 占全国总排放量的 40% 以上^[19]。因此,作为工业领域最大的 CO₂ 排放行业,电力行业的 CO₂、污染物减排潜力巨大。在低碳经济时代下,我国电力行业必须转变传统发展模式,着力构建电力低碳发展模式^[20,21],这不仅是行业自身可持续、清洁发展的必由之路,也是我国对世界应对环境气候变化的责任和贡献^[22,23]。因此,采取切实措施大力减少电力 CO₂ 排放,对实现我国低碳发展目标和应对气候变化行动的成效有着至关重要的影响。

0.2 研究意义

在 2015 年全国两会政府工作报告中,八次提到“能源”和“环保”,特别指出要打好节能减排和环境治理战役,环保和低碳发展必将贯穿于我国经济、社会 and 各个行业的

持续发展过程中。尤其，我国今年 CO_2 排放强度设定的目标是降低 3.1%，完成这个目标，必然依靠我国各个行业的联合配合才能实现，尤其是重点排放的工业领域。作为能源领域 CO_2 排放大户的电力行业，在两会提案议案中关于电力专题提到推动燃煤电厂超低排放改造，电力 CO_2 排放减排效果在很大程度上关系到国家减排目标的实现。因此，我国电力低碳发展问题，不仅是行业本身可持续发展的需要，也关乎国家整体的低碳发展成效。

0.2.1 现实意义

新中国成立后的 50 年，电力发展突飞猛进，连续 50 年平均每年都以 10% 以上的速度发展。截至 2014 年底，我国发电装机总容量已达到 13.6 亿千瓦，全口径发电量达 5.5 万亿千瓦时，均居世界第一位。其中，火电装机容量和发电量分别占全国总量的 67.4% 和 75.2%。火电占有相当比例的形式在短期内不会得到本质的变化，造成电力减碳压力不容忽视，研究电力低碳发展问题具有重要的现实意义。研究电力低碳问题可以为我国电力低碳发展相关规划政策的提出提供理论依据，不仅对国家、省（区）和行业的低碳发展规划提供支撑，而且还从发电端、用电端角度的低碳化发展提出针对性的建议。

首先，我国在世界重要场合多次提出承担减排责任，为了达到国家承诺的减排目标，全国范围的电力低碳问题研究主要对全国电力 CO_2 排放进行预测，研究全国减排考虑的主要因素，模拟电力低碳发展模式，寻求全国层面的减碳对策，即对我国总体低碳发展涉及主要问题进行系列研究。

其次，在全国低碳发展和减碳目标制定的大形势下，各个省（区）如何进行全国减碳目标的响应，完全相同的发展模式必然是不可取的。由于各个省（区）地域特征、经济发展、电力技术等存在很大的差异，减排承担的责任和潜力也存在差异性。从这个意义上而言，建立中观层面的电力低碳发展模型，揭示各个省（区）电力低碳发展中的相似性和差异性，探索符合省（区）本身特点的电力低碳发展模式和路径，为省（区）的电力减碳工作和政策提供合理的理论支撑，同时也为整个国家减碳目标的实现做出贡献。

再次，电力低碳发展问题不仅体现在宏观、中观研究层面上，也体现在发电端、终端。考虑电力系统整体性强，终端电力消费的低碳化与发电侧的低碳发展具有一定的关联性，同样也会影响系统整体的电力低碳化发展。终端主要以产业低碳化为体现点，突出产业减碳和节能含义，对电力低碳发展起到什么样的作用效果，如何实现产业用电低碳化等问题的研究是非常有必要的。

总之，本书所涉及的研究内容着眼点为不同角度下电力低碳发展面临的主要问题，

旨在对我国电力低碳发展规划、国家能源政策制定提供依据。

0.2.2 理论研究意义

随着我国电力行业的持续发展,电力需求量和 CO_2 排放不断增加。低碳理念的深入使得越来越多的学者和机构对电力低碳化问题进行不断的研究,电力低碳发展问题的研究主要侧重于某些突出方面,然而,电力低碳发展不是局部或单一问题的决策,而是系统性决策,不仅涉及电力低碳决策相关对象[全国、省(区)、行业]的问题,而且涉及电力系统发电和终端环节。到目前为止,电力低碳发展相关研究理论和方法之间缺乏有机的整合,尚未形成较为全面、系统的方法模型及理论体系,没有系统性的理论分析工具,制定出的电力低碳发展政策缺乏理论支持,容易造成政策的实用性不强或仅突出解决某一方面的矛盾。本书理论研究的意义在于:首先,完善电力低碳发展相关研究模型和方法理论,形成全国、省(区)、产业和发电端、终端较为完整的电力低碳理论方法研究体系。以我国电力低碳发展实际情况为出发点,结合电力低碳发展的关键问题进行研究,形成一系列适合我国国情的电力低碳发展模型和理论方法体系,对我国电力低碳减排进行系统分析。通过进行实证分析,为电力低碳发展政策的制定和发展路径的建立提供科学的理论支撑。其次,我国电力低碳问题主要集中于单一对象或环节的研究,本书的研究立足于多角度,从全国、行业、省(区)和发电端、终端对我国电力低碳发展过程中涉及的实际问题进行多方位建模研究。先从全国角度进行电力 CO_2 排放、驱动因素和低碳发展模式研究,再从产业角度和省(区)角度进行不同范围的研究。同时研究还涉及发电端和终端,结合不同区域范围,体现交叉维度,以使电力低碳发展研究更全面。此外,本书将预测理论、聚类方法、分解方法、评价理论、智能优化理论等引入到电力低碳发展问题研究中,实现交叉理论的融合应用,很好地解决所研究的问题。

0.3 研究思路及本书主要内容

电力低碳是指在不影响国民经济发展速度的前提下最低使用电力,或最大限度地减少 CO_2 排放,既包括电力供应侧清洁发电,新技术和新工艺的采用减少 CO_2 排放,也包括电力需求侧采用各种机制、政策和手段提高能效,达到节能减排的效果。此外,电力低碳发展不仅仅是行业本身的问题,也会直接影响国家相关低碳发展规划政策的制定。本书从政策建模的角度出发,以电能为研究载体,辐射全国、省(区)、相关行业及电力供应侧和电力需求侧,展开以减少 CO_2 排放为目标的系统研究,以期为我国电力低碳发展政策和发展机制提供科学的理论支撑。

本书在考虑我国电力 CO_2 排放特性基础上,主要对电力低碳发展路径和方向进行了

研究。研究包括在介绍研究背景及国内外研究现状的基础上,首先对我国电力行业能源消耗和 CO_2 排放的未来趋势进行科学的模拟预测,从定量的角度展现电力行业所面临的环境压力,并激发电力行业走低碳之路的积极性(第2章)。其次,在全国层面建立电力 CO_2 排放主要影响因素识别模型,在此基础上,进行微观解释变量的扩充,并考虑能源和产业政策变化,进行电力低碳发展情景模拟(第3章、第4章);在省(区)层面建立电力 CO_2 排放特性分析模型,并进行区域低碳电力发展路径模型设计及实证研究(第5章);在终端电力消费角度建立电力消费 CO_2 排放效率模型,并从产业结构和终端电力消费技术两个主要角度进行电力低碳发展路径研究(第6章)。再次,建立电力低碳发展效果综合评估模型,对低碳发展措施的实施成效进行量化的评价(第7章)。本书最后一章对全书研究进行总结,并对未来研究进行展望(第8章)。各章的关系如图0-1所示。

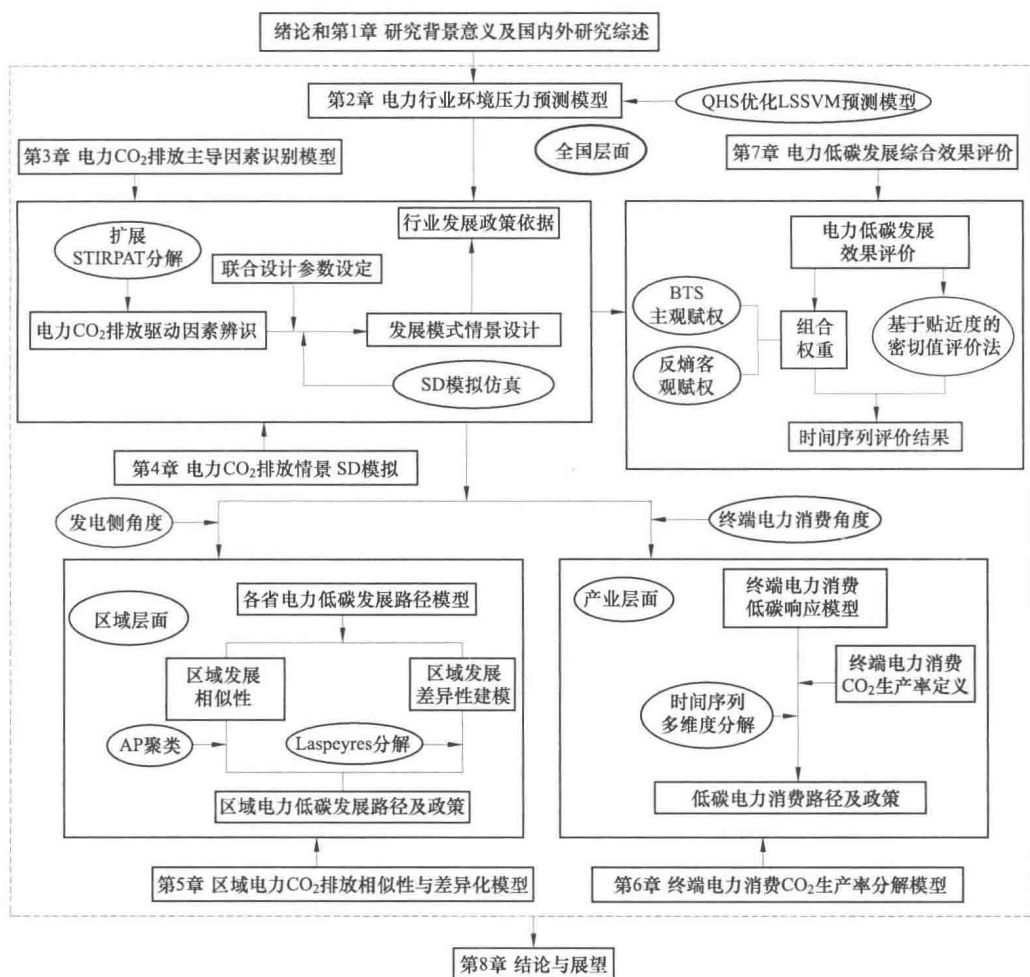


图0-1 各章关系图

各章具体研究内容如下:

绪论、第1章介绍本书的研究背景和研究意义,并对本书所涉及的各个领域的相关研究现状、进展进行了系统综述和分析,在此基础上引出本书的具体研究内容。

第2章建立电力行业环境压力预测模型。根据电力能源消耗与 CO_2 排放历史数据,建立量子遗传搜索的最小二乘支持向量机预测模型,进行未来电力能源消耗和 CO_2 排放趋势的模拟预测。预测结果能够定量展示电力行业面临的环境压力,有效地激发电力行业减碳的积极性。

第3章建立全国电力 CO_2 排放驱动因素识别模型。在传统STIRPAT模型基础上,根据电力行业技术特点,从宏观和微观两个角度将技术因素进行有效扩展。考虑到解释变量之间存在的多重共线问题,采用PLS算法得到模型的拟合参数值。通过计算变量重要性VIP值,识别出对电力 CO_2 排放主体变量变化起重要贡献的变量,这些变量就是电力行业未来减碳的主要控制因素,为电力行业低碳发展提供方向性启示。同时,这些重要的驱动因素也是下一章电力低碳发展模式设计的主要输入因素。

第4章是基于系统动力学的电力行业 CO_2 排放情景模拟。在第3章识别的主要驱动因素基础上,考虑政策和电力技术的变化进行输入变量的扩展;再根据系统动力学理论,绘制电力 CO_2 排放系统因果反馈关系图,构建系统流图和变量关系式,建立我国电力 CO_2 排放系统动力学模型。根据输入参数变化设计出几种电力低碳发展模式,并分析计算不同模式下电力行业 CO_2 排放总量、电力生产 CO_2 排放系数和电力消费 CO_2 排放系数,并进行历史和未来发展的分析,其结果从技术角度和管理角度可对我国电力行业减碳起到一定的政策指导作用。

第5章进行区域电力 CO_2 排放相似性与差异化建模分析。研究基于省(区)层面的电力 CO_2 排放相似性和差异性,并设计区域低碳发展路径。采用AP聚类算法,以各省(区)的发电结构、发电能耗强度、人均GDP和单位GDP电耗强度为聚类指标,根据各个省(区)呈现出来的碳排放特性进行自然聚类,并进行类内相似性和类间差异性分析。再根据Laspeyres完全分解模型量化衡量区域发电 CO_2 排放系数、发电结构、电耗强度、经济与人口这五个主要因素对各省(区)电力 CO_2 排放影响差异,并以此提出不同省(区)差异化的低碳发展路径。根据聚类和发展路径分解可以综合得到因地制宜的区域电力低碳发展方向和政策。

第6章建立终端产业电力消费 CO_2 生产率分解模型。从终端产业角度进行电力消费碳排放生产率分解建模,以终端产业结构调整和产业技术进步为主要分析因素,从产业和各产业用电效率两个角度分析对总体电力消费 CO_2 生产率的影响。

第7章建立电力低碳发展综合效果评价模型。参考国内外相关参考文献,建立适合于我国电力低碳发展效果评价的指标体系,并结合BTS主观赋权法和反熵客观赋权法,

对指标进行组合赋权，再采用基于贴近度的密切值法对研究期内电力低碳发展效果进行时间轴方向的综合评价，并根据评估效果对发展方向提出改进性意见。

第 8 章给出结论与展望。对全书的主要研究结论及创新点进行了总结，并对未来研究进行了展望。



国内外研究进展综述

本章主要对国内外电力低碳领域研究进展进行综述，并在此基础上提出进一步的研究内容。

1.1 CO₂ 排放预测相关研究

CO₂ 排放预测相关模型大体可以分为经典预测模型、计量相关预测模型和智能技术相关预测模型三类。在经典预测模型中，常用的方法有趋势外推法、logistic 曲线模型、回归模型、灰色 GM (1, 1) 模型等。

文献 [24~26] 采用趋势外推法分别对世界总体 CO₂ 排放和印度火电厂 CO₂ 排放进行预测。文献 [27, 28] 分别采用 logistic 曲线模型和非齐次指数方程-线性方程混合模型对化石燃料 CO₂ 排放进行了预测。文献 [29] 采用逻辑斯谛 (logistic) 模型，假定 CO₂ 排放与能源消费成正比，对我国 30 个省 (区) 的 CO₂ 排放进行了预测。趋势外推法是根据识别历史数据趋势对未来发展进行预测的方法，但是 CO₂ 排放量可能会受到多种因素的影响，如经济增长、燃料消耗、技术进步和能源效率，而趋势外推法无法考虑这些影响因素，因此，获得更加精确的预测结果有较大的困难。

文献 [30] 中，Bianco Vincenzo 等人意识到这个问题，提出采用回归模型的方法。文献 [31] 分别应用偏最小二乘回归和岭回归构建了预测山东省能源消费 CO₂ 排放的 STIRPAT 模型。文献 [32] 采用多输入灰色模型对金砖五国 CO₂ 排放进行预测。文献 [33, 34] 应用灰色 GM (1, 1) 模型分别对巴西和台湾地区 CO₂ 排放进行了预测。此外，计量经济学模型在 CO₂ 排放领域也得到广泛应用：文献 [35] 将投入产出法和情景分析法相结合，并应用于八大经济发展区域的能源需求和 CO₂ 排放建模；文献 [36] 提出了结合能源关键指标和 TIMES (The Integrated MARKEL-EFOM System) 的 G5 模型，并应用于中国能源与 CO₂ 排放长期预测问题。

近年来，随着人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 技术的不断发展，AI 已经被成功应用到能源与 CO₂ 排放预测领域。如文献 [37] 提出了一种混合模糊线性回归和反向传播网络方法，并应用于全球 CO₂ 浓度预测。文献 [38] 提出基于相关和主成分的优化

神经网络模型, 并进行温室气体排放预测。文献 [39] 利用灰色关联理论, 对我国 CO_2 排放影响因素进行筛选, 并利用反向传播 (Back Propagation, BP) 神经网络进行预测。

现有的主要文献大部分是针对能源消费 CO_2 排放进行建模预测, 关于电力 CO_2 排放的预测非常有限。此外, 基于人工智能和计量经济学模型的 CO_2 排放预测方法计算过程相对复杂, 含义不明晰, 而且都需要较大的数据样本, 才能对事物未来发展趋势进行科学合理的模拟和预测。考虑到电力 CO_2 排放数据有限, 无法获取大样本数据, 因此, 如何根据小样本数据进行我国电力 CO_2 排放预测是需要解决的一个关键问题。电力 CO_2 排放预测模型要能够充分利用有限的的数据, 得到具备满意预测精度的结果, 同时可以有效降低预测风险, 这样才能相对准确地衡量我国电力 CO_2 排放未来趋势和电力行业所面临的环境压力。

1.2 低碳发展路径及情景设计相关研究

1.2.1 驱动因素及路径相关研究

分析能源低碳驱动因素和发展路径的实质是将 CO_2 排放表示为几个因素指标的乘积, 并根据确定权重的不同方法进行分解, 以确定各个指标的增量份额。常见的因素分解模型有 Laspeyres 指数法、环境影响模型 (Impact Population Affluence Technology, IPAT)、迪氏对数指标分解法 (Logarithmic Mean Weigh Division Index Method, LMDI)、STIRPAT 模型、Kaya 公式等。这些分解模型各有特点和适用性, 并在相关领域取得了较好的应用。其中, 经典 IPAT 模型是由 Ehrlich 和 Holdren 在 1971 年提出的^[40]。IPAT 模型表明, 影响环境的三个直接因素是人口、人均财富量 (或国内生产总值中的收益) 和技术以及相互间作用的影响。该模型实质是对这三者关系阐述的一个概念性框架。大量的理论与实证研究表明, 它是一个被广泛认可的环境、人口、技术和经济关系的模型, 现在仍然被广泛应用于环境恶化的人为驱动力 (如人口、经济活动、科技水平、生活方式等) 分析。IPAT 模型结构简单, 易于操作, 但也存在一定的局限性, 即在保持其他因素不变的前提下, 分析一种因素改变对环境变化的影响时, 得到的结果就是对因变量的等比例影响。为了克服这一局限性, Dietz and Rosa 在 1994 年将 IPAT 模型以随机的形式表示, 通过对人口、人均财富量 and 技术的回归, 进行环境影响的随机估计, 提出了环境影响随机模型——STIRPAT 模型。该模型通常变化成取对数后的线性形式, 反映了 CO_2 排放量和人口、人均财富量和技术之间的线性关系。目前 STIRPAT 模型已经广泛应用于各个领域如生态足迹分析、交通、制造业等领域, 用以定量分析环境影响因素对 CO_2 排放量的影响^[41-43]。到目前为止, 还没有文献将 STIRPAT 模型应用于电力行业, 尤其是发电 CO_2 排放研究。因此, 本书提出扩展 STIRPAT 模型, 并将其应用于发电 CO_2

排放影响驱动力研究。无论在传统 IPAT 模型还是随机 STIRPAT 模型中,人口因素(P)、人均财富量因素(A)和技术因素(T)都可以根据行业的具体情况进行分解。由于技术因素是一个可以进行收缩控制的因素,因此,将技术因素具体化以符合电力 CO₂ 排放的实际是一个关键问题。此外,系统地研究电力 CO₂ 排放影响因素是分析电力 CO₂ 排放变化的关键所在。关于电力 CO₂ 排放影响因素的分析,大多数文献主要集中在某一个或者少数几个因素。降低电力 CO₂ 排放不仅仅是电力行业技术减排方面的问题,同时还涉及经济、社会各个方面,因此将所有潜在因素进行综合分析是非常必要的。文献[44]主要考虑发电结构变化和发电能源强度变化两个因素,是最早采用分解技术对亚洲 12 个国家(1980~1990 年)发电 CO₂ 排放强度进行研究的文献。文献[45]在文献[44]的基础上开展了进一步研究,借助 LMDI 模型系统分析了经济增长、电耗强度、发电能源强度和发电结构对主要亚太国家发电 CO₂ 排放变化的影响。文献[46]采用 LMDI 分解方法对我国电力 CO₂ 排放主要影响因素进行识别,主要考虑的因素包括 CO₂ 排放系数、发电量、发电效率、发电结构、电耗强度和 GDP 规模。识别出经济是造成发电 CO₂ 排放的主要因素,其次是发电效率、电耗强度和发电结构。文献[47]应用 LMDI 模型对我国 30 个省(区)电力 CO₂ 排放强度影响因素进行分解,得到的结论是影响 CO₂ 排放强度的主要因素有发电煤耗、电耗强度和发电结构。文献[48]同样采用 LMDI 分解技术对世界 7 个主要国家电力 CO₂ 排放驱动因素进行了分析,主要考虑的因素有发电量、发电结构和发电能源强度,其结论是不同因素对于 CO₂ 排放的驱动作用因国家不同而不同。文献[49]在综合考虑我国电力 CO₂ 排放影响因素基础上,引入了 GDP、工业结构和技术进步等主要因素,采用自回归分布滞后模型进行协整关系检验。文献[50]采用 Laspeyres 分解技术验证了发电结构、能源结构、发电效率、CO₂ 排放强度、辅机用电等因素对于加拿大温室气体排放量的影响,得到了能源需求、发电结构变化和天气是造成该国温室气体变化的主要动因的结论。文献[51, 52]从终端电能消耗的角度,分别采用自适应权重分解法和 Laspeyres 分解法对电力终端能源消费及 CO₂ 排放影响因素进行了分析。

综合以上文献,不难发现关于发电侧 CO₂ 排放分解研究的文献较少,而且现有的文献仅仅限于行业相关技术参数的分析和研究,鲜有系统地,从宏观角度去考虑经济、人口、产业结构等因素,并开展相关分析和研究。本书在系统地分析发电侧 CO₂ 排放影响因素基础上,引入经济、人口和产业结构等因素,同时结合可控技术因素的电力行业扩展,构建适合电力 CO₂ 排放驱动因素识别模型。

1.2.2 低碳发展路径和情景设计研究

低碳发展路径和情景设计是确定未来低碳发展方向常用的方法。在减排情景设计方面,文献[53]提出了一种地区低碳情景分析方法,并就日本京都的低碳情景进行了分