

中国建筑业 碳排放： 特征与机理

杜 强 / 著

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press

中国建筑业 碳排放： 特征与机理

杜 强 / 著

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国建筑业碳排放：特征与机理/杜强著. —北京：
经济科学出版社，2019. 8

ISBN 978 - 7 - 5218 - 0780 - 6

I. ①中… II. ①杜… III. ①建筑业 - 二氧化碳 -
排气 - 研究 - 中国 IV. ①X511②F426. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 175616 号

责任编辑：程辛宁

责任校对：杨海

责任印制：邱天

中国建筑业碳排放：特征与机理

杜强 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址：北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编：100142

总编部电话：010 - 88191217 发行部电话：010 - 88191522

网址：www. esp. com. cn

电子邮件：esp@ esp. com. cn

天猫网店：经济科学出版社旗舰店

网址：http://jjkxcbs. tmall. com

固安华明印业有限公司印装

710 × 1000 16 开 15 印张 240000 字

2019 年 8 月第 1 版 2019 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5218 - 0780 - 6 定价：76. 00 元

(图书出现印装问题，本社负责调换。电话：010 - 88191510)

(版权所有 侵权必究 打击盗版 举报热线：010 - 88191661)

QQ：2242791300 营销中心电话：010 - 88191537

电子邮箱：dbts@ esp. com. cn)

前 言

近年来，中国在取得巨大经济发展成就的同时，所消耗的能源以及由此带来的碳排放显著增加等问题日益凸显。建筑业是国民经济重要支柱产业，其低碳化发展已经成为我国发展低碳经济的重要组成部分，对我国社会经济可持续发展具有举足轻重的作用。

现有碳排放研究多立足于国家或区域层面的测算及影响因素分析，面向特定行业进行的系统性研究相对较少，特别是对建筑业这一碳排放显著的行业指导作用有限。本书依托低碳经济学、能源经济学、计量经济学等相关理论，将空间计量模型、LMDI 因素分解模型、超效率 SBM 模型、系统动力学、能源-经济-环境 CGE 模型等低碳经济理论与分析模型引入建筑行业。从行业研究的视角出发，进行不同空间尺度的实证研究，构建建筑业碳排放核算体系；识别建筑业碳排放特征，解析碳排放影响因素，揭示建筑业碳排放演化机理，量化建筑业的碳减排潜力；构建建筑业碳排放政策评价基本框架，尝试夯实建筑业低碳理论体系基础，为在国家碳减排总目标下科学制定与动态调整建筑业减排任务、有效制定建筑业碳减排引导政策与管理办法提供可靠依据。

全书分为七章。第一章在介绍研究背景、梳理国内外相关研究的基础上，阐释研究意义，总述本书研究内容及主要贡献。第二章对建筑业碳排放研究领域的重要概念与指标进行明确界定并构建量化模型，面向全国及省域的行业碳排放量和碳排放强度进行核算；分析省域间的碳排放空间差异与分布状况，刻画我国建筑业碳排放的时空分布格局和动态演化特征。第三章从长期和短期两方面描述建筑业碳排放与经济发展间的关系，面向各省特点探究建筑业碳排放影响因素，进一步揭示影响因素的空间异质性。第四章从静态与动态两个角度对建筑业碳排放效率进行测评，结合实证分析探讨各省减排潜

力，并从全国与区域层面提出政策建议。第五章在不同经济增长率和政策因子情景下对建筑业碳排放进行模拟，分析建筑业碳排放系统内部变量的因果关系，尝试为碳排放政策制定提供参考依据。第六章分析建筑业能源结构调整对建筑业能源使用、碳排放以及行业产出的动态影响。第七章阐明本书的主要结论，并从关联产业网络等视角对建筑业未来低碳发展进行了进一步思考。

在本书的撰写过程中，许多专家给予了无私的支持，在此表示衷心的感谢。王宁、卫婧、孙强、冯新宇、李毅、武敏、许雅丹、陆欣然、李喆、邵龙、韩潇、郭曦倩、吴佼、燕云庆等研究生参与了相关内容的研究。白礼彪、吕晶、史金召、邢一亭等老师参与了校核工作并提出了宝贵意见，在此特别致谢。

本书的相关研究与出版得到了国家社会科学基金青年项目（16CJY028）、教育部人文社会科学基金项目（15YJC790015）、陕西省“青年拔尖人才”项目（陕组通字〔2018〕33号）及长安大学卓越青年基金项目（300102238303）的支持。

限于水平与时间，书中尚有诸多不足之处，敬请大家批评指正。

杜 强
2019年8月

目 录

第 1 章 绪论 / 1

- 1.1 研究背景及意义 / 1
- 1.2 国内外研究现状 / 3
- 1.3 研究内容与主要贡献 / 23

第 2 章 中国建筑业碳排放特征 / 26

- 2.1 概念界定 / 26
- 2.2 建筑业碳排放核算 / 29
- 2.3 建筑业碳排放统计性描述 / 32
- 2.4 建筑业碳排放时空特征 / 41
- 2.5 本章小结 / 62

第 3 章 中国建筑业碳排放影响因素 / 64

- 3.1 建筑业碳排放与行业发展关系 / 64
- 3.2 建筑业碳排放影响因素辨识与分析 / 73
- 3.3 建筑业碳排放影响因素空间异质性 / 83
- 3.4 本章小结 / 91

第 4 章 中国建筑业碳排放效率 / 93

- 4.1 建筑业碳排放静态效率测评 / 93

- 4.2 建筑业碳排放动态效率测评 / 115
- 4.3 建筑业碳排放效率影响因素辨识与分析 / 123
- 4.4 本章小结 / 129

第5章 中国建筑业碳排放预测与情景模拟 / 132

- 5.1 建筑业碳排放预测 / 132
- 5.2 建筑业碳排放情景模拟 / 137
- 5.3 本章小结 / 153

第6章 中国建筑业碳减排政策探讨 / 154

- 6.1 CGE 模型构建 / 154
- 6.2 能源结构调整对建筑业碳减排的影响 / 163
- 6.3 本章小结 / 171

第7章 主要结论与思考 / 173

- 7.1 主要结论 / 173
- 7.2 建筑业可持续发展的一些思考 / 175

参考文献 / 207

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

人类社会在快速发展的同时对能源的依赖也不断增强，石油、煤炭与天然气等化石能源的大量消耗使全球碳排放量急剧增长，由此带来的全球气候变暖问题日益显著，已经严重制约着人类社会的可持续发展。2017 年世界气象组织（World Meteorological Organization, WMO）在《温室气体公报》中指出，过去 70 年来碳排放量几乎是末次冰期结束时的 100 倍，更是达到数百万年来的最高水平。碳排放问题已经逐步成为社会关注的焦点，而隐藏在碳排放问题背后的也不单单是气候变化这一科学问题，更包含着发展空间、经济发展质量等诸多问题，所以各国政府纷纷围绕着碳排放权与能源安全展开了激烈的竞争与博弈，使碳排放问题从科学层面上升到社会、经济与政治层面。

国际社会为应对碳排放问题采取了积极行动。1987 年，联合国发表《我们共同的未来》工作报告，从全球视角探讨了环境与社会发展问题，并对“可持续发展”理念进行了阐释。1988 年，联合国环境规划署与世界气象组织一同组建了联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC），以便对全球碳排放状况和气候变化对人类社会的影响进行评估，提出减缓气候变化的可行方案。随后，在 1992 年巴西里约热内

卢联合国环境与发展会议上，联合国组织各国进行协商，并制定了《联合国气候变化框架公约》，为世界各国在应对气候变化问题上进行合作提供了基本依据。1997年，《联合国气候变化框架公约》的补充条款《京都议定书》明确了各参与国温室气体减排的责任与时间。

国际能源署（International Energy Agency, IEA）所公布的数据显示，中国能源消耗所排放的二氧化碳在2015年达到了1064179万吨，已远远超过排名第二美国的517234万吨，占世界总比重达29.51%，中国已成为国际最大的碳排放国家，面临着前所未有的减排压力。为实现可持续发展，我国提出了节能减排的低碳经济发展目标，主动承担起碳减排任务。在2015年巴黎世界气候大会上，我国政府承诺“将于2030年左右使碳排放达到峰值并争取尽早实现，2030年单位国内生产总值碳排放比2005年下降60%~65%”。2017年，中共十九大报告明确提出，推进绿色发展，加快建立绿色生产和消费的法律制度和政策导向，建立健全绿色低碳循环发展的经济体系。并在《“十三五”节能减排综合工作方案》中进一步细分减排目标，即到2020年，全国万元国内生产总值能耗比2015年下降15%，并且将节能减排责任目标明确落实到省级和行业层面。

建筑业是我国国民经济的重要产业部门之一，具有产业关联性强、能耗高与资源利用率较低等特点，承担着较大的减排压力。根据中国建筑节能协会发布的《中国建筑能耗研究报告（2017年）》，2015年我国建筑业能源消费量为8.57亿吨标准煤，占全国能源消费总量的20%。建筑业吸收了其他产业部门大量的物质产品，对关联行业具有显著的辐射与带动作用，尤其是与冶金、建材、石化、机电和轻工业等行业联系紧密。其产生的直接与间接碳排放量已经占据全国碳排放总量的30%~40%，对生态环境造成了不良影响，并且随着我国城镇化建设的不断推进，建筑业碳排放量或将进一步走高。同时，现阶段各省份的建筑业发展并不均衡，不同省份建筑业碳排放效率存在较大差异，其影响因素与减排潜力也不尽相同，面向建筑业碳排放开展相关研究对建筑业节能减排和低碳发展具有重要的现实意义。

1.1.2 研究意义

建筑业亟须通过节能减排促进行业的健康可持续发展。迄今为止，面向

我国建筑业碳排放的相关研究主要基于国家层面展开,从省域角度对建筑业碳排放进行全面、系统研究的相对较少。鉴于我国各地区发展不平衡,各省份建筑业碳排放差异较大。本书从多角度对我国建筑业碳排放特征及机理进行研究,所得结论可为我国各省建筑业制定差异化的减排政策提供科学依据。本书的研究意义主要体现在以下两点:

(1) 理论意义。目前国内外对碳排放研究已经形成了一定的理论基础,但具体行业范畴内的碳排放特征、影响因素及政策模拟等相关研究较为有限。本书的选题依托低碳经济学、能源经济学、计量经济学、统计和政策研究等相关理论,从关联产业链及终端产品消耗视角,全面、准确计算了建筑业碳排放,丰富了建筑业碳排放核算体系研究;识别建筑业碳排放特征,解析碳排放影响因素,明确碳减排关键点,构建建筑业碳排放研究与政策评价基本框架,揭示建筑业碳排放演化机理,为建筑业低碳理论体系的形成奠定基础。

(2) 实践意义。建筑业发展低碳化已经成为我国发展低碳经济的重要组成部分,建筑业低碳转型对我国经济发展与环境保护具有举足轻重的作用。本书解析建筑业碳排放特征及其影响因素,量化建筑行业的碳减排潜力与所需资源,评价建筑业减排政策,为在国家碳减排总目标下科学制定与动态调整的建筑行业减排任务、有效制定建筑行业碳减排引导政策与管理办法提供可靠依据,进而提高政策制定与管理系统的可靠性、自适应性和高效性。

1.2 国内外研究现状

近年来,随着温室效应的不断加剧,环境问题已成为人类社会关注的重点话题,建筑业作为高能耗、高污染行业的代表,消耗能源的同时排放出大量的二氧化碳气体。有效控制建筑业碳排放已经成为研究重点课题,实现建筑业低碳发展,是未来需要进一步探索的重点领域。本书从碳排放特征、碳排放影响因素、碳排放预测、碳排放情景模拟和减排政策等方面梳理现有的国内外文献,为后文开展建筑业碳排放相关研究奠定理论基础。

1.2.1 碳排放特征相关研究

1.2.1.1 碳排放核算

针对建筑业碳排放，国外较早地意识到建筑活动会产生大量碳排放，对生态环境造成较大影响。从20世纪80年代开始，大量的气候商讨会及相关政策的召开与颁布，引起了全世界对建筑能耗与建筑减排的重视。例如，英国作为低碳经济的倡导者，发布的《可持续发展住宅规范》中面向零碳排放住宅制订了各个阶段的目标与计划。关于建筑业碳排放的研究主要聚焦到建筑业节能减排与全生命周期建筑业碳排放特征，相关学者从不同区域的多个角度对建筑业碳排放展开了研究。卡萨尔斯（Casals, 2006）从建筑节能减排法规条例与评价认证方案角度，将欧盟与西班牙节能减排一般实施条件进行对比分析，目的在于有效的监控建筑业能源消耗，从而减少其碳排放量。李军等（Li Jun et al., 2009）对在中国城市建筑业中实施与执行的低碳可持续发展的节能改造技术的情况进行探究，并预测分析了这些措施对改善气候变化的作用。费兰特（Ferrante, 2011）研究了零能源平衡效应在地中海气候地区的探索与实践。零能源平衡是建筑设计阶段中最基本且重要的组成部分，通过使用风能转化设备、高热量砖结构、高反射材料、太阳能等高效率低能耗的节能建造技术，可以大范围的在城市中推广。同时，部分学者采用全生命周期法评估建筑建造与环境的关系。例如，沃哈根（Wallhagen, 2011）以瑞士某办公大楼为研究对象，将其全生命周期划分为设计阶段、建造阶段、运营阶段与拆除阶段，研究了各阶段活动碳排放情况。

国内针对建筑业碳排放的研究较晚，多数研究主要从国家、省域或市域层面进行横向比较，或者从时间维度纵向比较建筑业碳排放特征的演变。这些研究都从侧面验证了建筑业节能减排的重要性，并提出相应的措施及政策建议。姜宏等（2010）运用系统科学思想探究了我国城镇化进程当中以高碳排放为发展代价的原因，分析了中国建筑业能源消耗与碳排放的增长趋势，并提出了推广建筑业低碳化的必要性、存在的问题及改进政策建议。蔡富强等（2010）针对建筑业提出可再生能源利用、节能减排专项基金的建立、低碳建筑产业的规划、合理调控房地产行为等建议，从而健康有序的促进建筑

业低碳化发展。尚春静等(2011)以全生命周期思想为基础,建立了面向建筑业的生命周期碳排放核算方法模型,定量核算和对比分析了全生命周期内钢筋混凝土、木结构与轻钢结构3种不同形式结构的碳排放情况,为制定有效的减排指标与政策提供了理论支持。祁神军等(2016)以投入产出分析框架为基础,针对建筑业碳排放特点,提出关联产业完全消耗系数、碳排放完全分配系数、碳排放感应度与感应度系数、碳排放影响度与影响力系数等指标,从而定量分析了建筑业碳排放与关联产业的前向后向关系及其波及性。储诚山(2011)等选取建筑业能源消耗强度与碳排放强度等指标描述建筑业碳排放的发展趋势,通过对比分析指出我国建筑业在可持续发展道路中存在的机遇与挑战,并探究了建筑业在节能减排工作中存在的主要问题,并针对这些问题分别从宏观与微观两个视角提出建筑业低碳化的对策与建议。

1.2.1.2 碳排放区域差异及空间效应

由于研究区域在科学技术水平、人口规模、经济发展水平等方面的不同导致其碳排放水平也存在较大的差异,如何合理有效地评价碳排放在区域间的差异成为关键,因此,碳排放区域差异及空间格局演化成为研究的热点。

国外学者针对区域差异碳排放特征的变化研究,按照不同地理尺度可将研究范围划分为国家层面与州或省域层面。在国家层面的碳排放差异研究中,金姆等(Kim et al., 2002)为了探究工业化发达国家、发展中国家、新兴工业化国家钢铁行业碳排放的差异,选取中国、印度、巴西、墨西哥、美国与韩国等国家作为核算对象。研究表明,不同区域的国家能源利用效率存在着显著的差异,提高能源的利用效率是减少碳排放的有途径之一。斯特恩等(Stern et al., 2010)通过随机前沿模型,对两个发展中国家——中国与印度提出的2020年减排目标进行了难易程度的评估。面向州或省域层面,罗奇(Roach, 2013)采用美国2000~2010年各州的面板数据,探究了各州碳排放总量、能源消耗总量与人均GDP之间的关系。结果表明在产业结构、社会偏好、经济发展及资源禀赋方面存在明显的差异,这些差异为节能减排政策的制定提供了大量的经验。大卫斯多迪尔等(Davidsdottir et al., 2011)对1980~2000年美国48个州(不包括阿拉斯加州、夏威夷州与华盛顿特区)的碳排放与经济增长的动态关系进行探究,研究表明碳排放与经济之间存在明显的双向因果关系,具体表现为合理的节能减排政策既可以有效地降

低碳排放强度也可以促进经济的良性发展。

当面向中国区域的碳排放差异研究时，国内部分学者依据地理分布和经济水平，将我国研究区域划分为八大区域（南部沿海、东部沿海、北部沿海、中部、东北、京津、西南、西北）或者三大区域（中部、东部、西部）。例如，岳超等（2010）、付云鹏等（2015）、尹伟华等（2017）均将研究区域划分为东部、中部及西部三大区域或八大区域，对各区域碳排放的增长趋势与特征进行研究。邓吉祥等（2014）基于区域间投入产出分析框架，对1995~2010年我国八大区域的碳排放的空间格局演变及变化特征进行了深入的探讨。还有部分学者参照碳排放量的相对高低水平将区域碳排放差异划分为高碳排放区、低碳排放区与中等碳排放区三个层次进行分析。李国志等（2010）通过对我国1995~2007年各省份平均碳排放量的核算，将研究对象区域划分为高碳排放区、低碳排放区与中等碳排放区，研究表明各层次碳排放水平区域存在显著的差异且差异呈现继续扩大的趋势。张珍花等（2011）依据各省份年均碳排放量将区域碳排放划分为轻度、中度与重度区域，并探讨了形成碳排放区域差异的影响因素，其中能源结构、产业结构与经济水平为最主要因素。

空间效应以空间计量经济理论为基础，通过对研究对象空间特征进行定量分析，从而探究经济活动在空间中动态变化规律。大多数研究集中在采用空间自相关分析模型对碳排放的空间聚集及异质效应进行研究。林伯强等（2011）采用空间计量分析框架，对我国碳排放空间动态演变特征进行分析，结果表明区域碳排放强度与人均碳排放均呈现明显的空间集聚现象。程叶青等（2013）通过空间自相关分析模型及影响因素分析方法，对我国在省域层面能源消耗引起的碳排放的时空演变特征进行分析，其中碳排放强度产生较明显空间集聚的现象，造成该现象的主要因素有能源结构及强度水平、产业结构与城镇化率等。赵巧芝等（2018）以我国能源碳排放强度为研究对象，运用核密度与空间自相关理论探究碳排放空间格局的动态变化趋势，结果表明各省份碳排放强度表现出正相关关系的空间集聚现象，其中高碳排放强度与低碳排放强度区域呈现聚集且状态较为稳定。

部分学者也通过其他分析模型对碳排放的动态变化机制进行探究。胡艳兴等（2016）采用地理加权回归（geographic weighted regression, GWR）模型与经验正交函数（empirical orthogonal function, EOF），对我国省域层面碳

排放与碳排放强度的变化趋势及空间异质性进行描述。梁中等（2017）、乔健等（2017）、李兰兰等（2017）均将重心概念运用到碳排放动态变化研究中，探讨了经济重心、能源重心与碳排放重心的迁移轨迹。

碳排放的空间趋同问题也是碳排放研究的重要课题之一，目前针对碳排放的空间趋同研究相对有限，大多研究主要集中在验证碳排放空间的绝对趋同与条件趋同。布罗克（Brock, 2010）等选取 173 个国家的面板数据，通过优化后的索洛模型进行验证分析，结果表明各个国家的人均碳排放存在明显的绝对趋同与条件趋同。约伯特等（Jobert et al., 2010）以 22 个欧洲国家为研究对象，验证得到碳排放存在绝对趋同效应，同时分析了各因素对碳排放趋同速率的影响，其中产业结构调整可以明显减小其趋同速率，而人口规模对其趋同速率影响较小。张翠菊与覃明锋（2017）采用我国碳排放样本数据，验证得到碳排放强度表现出绝对 β 趋同与条件 β 趋同，其中东部、西部与中部地区存在显著的俱乐部趋同效应，通过调节能源消费结构与产业结构可影响其趋同效应。孙慧与邓小乐（2018）通过对我国碳排放生产效率进行分析，验证了碳排放生产效率不具备显著的 σ 趋同条件，但表现出显著的条件 β 趋同与绝对 β 趋同。

1.2.1.3 碳排放效率

碳排放效率作为环境效率研究的热点问题，成为国内外众多学者的关注点。面向碳排放效率的核算研究可分为静态研究、动态研究两个方面。

在碳排放静态研究方面，扎伊姆与塔斯金（Zaim and Taskin, 2000）利用数据包络分析法（data envelopment analysis, DEA）对经济合作与发展组织（Organization for Economic Co-operation and Development, OECD）各成员国的碳排放效率进行了测度，并对各国间的差异进行了分析。2001 年，托恩（Tone, 2001）建立了基于松弛变量的数据包络分析（slacks-based measure, SBM）模型，解决了松弛变量会对效率测度结果产生影响的问题。随后，杨宇等（Yang Yu et al., 2019）分别运用径向 DEA 模型、SBM 模型、方向性距离函数（directional distance function, DDF）模型对中国省域碳排放效率进行了测度。孟凡一等（Meng Fanyi et al., 2016）针对中国省域能源效率与碳排放效率，利用 6 种广泛使用的 DEA 模型进行了测度，结果表明东部地区相比其他地区拥有较高的能源效率与碳排放效率，并且实证表明非径向 DEA 模

型具有更强的分析识别能力。伊夫蒂哈尔等 (Iftikhar et al., 2016) 通过 SBM 模型对全球 26 个主要经济体的能源效率与碳排放效率进行了评价, 表明中国的碳排放效率拥有巨大的提升空间。在单要素碳排放效率视角下, 许俊杰等 (2011) 将我国单位国内生产总值碳排放量、人均碳排放量、累积碳排放量与碳排放总量等指标同国际水平进行了比较, 揭示了当下我国碳排放问题的严峻性。在全要素碳排放效率研究方面, 王群伟等 (2010) 通过构造前沿函数模型对区域碳排放效率进行了评价并对减排潜力进行了测度。刘亦文等 (2015) 基于超效率 DEA 模型, 对省域碳排放效率展开实证研究, 结果显示碳排放效率整体呈上升态势但增长速度缓慢。张金灿等 (2015)、余敦涌等 (2015) 采用随机前沿方法 (stochastic frontier approach, SFA) 对省域碳排放效率进行了分析, 并给出相应的政策建议。相天东 (2017)、孙秀梅等 (2016)、陈晓红等 (2017) 尝试使用不同的 DEA 模型对碳排放效率进行三阶段分析。王勇等 (2017) 分别构建了零和收益 DEA 模型对 2030 年碳排放峰值目标进行了省域分解。郭炳南等 (2017) 基于包含非期望产出的超效率 SBM 模型面向省域碳排放效率与减排潜力展开实证研究, 结果表明大多数省份的减排潜力超过 50%。建筑业碳排放效率静态研究方面, 冯博等 (2017) 从全要素能源效率视角进行了分析, 并将碳排放量作为非期望产出纳入 DEA 模型。陆宁等 (2013) 确定了建筑业碳排放效率的评价指标并阐明了其内涵。陆菊春等 (2015) 将建筑业总能耗作为产出指标, 构建了 DEA - Malmquist 模型对省域建筑业低碳行为效率进行研究并提出对策建议。陈钢等 (2017) 将广义 DEA 模型应用于省域建筑业碳排放效率的测度与评价中。

碳排放效率的动态研究与静态研究相比较少。周鹏等 (Zhou Peng et al., 2010) 在全要素生产率框架下提出了 Malmquist 碳排放效率指标 (malmquist CO₂ emission performance index, MCPI), 并对全球 18 个碳排放大国的碳排放效率动态变化进行了对比研究。张宁等 (Zhang Ning et al., 2015) 针对交通运输业建立了非径向的 Malmquist 碳排放效率指标 (non-radial malmquist CO₂ emission performance index, NMCPI) 进行研究, 结果表明交通运输业碳排放效率有所降低。林伯强等 (Lin Boqiang et al., 2015) 将 Malmquist 指数模型应用于区域农业与工业的碳排放效率动态测度中。另有学者将 DEA 模型与 Malmquist 指数模型相结合, 对碳排放效率从动态与静态双视角进行研究。王群伟等 (2010) 利用包含非期望产出的 Malmquist 指数模型对各省碳排放效

率的动态变化进行了测度,发现1996~2007年间效率不断提高,平均改善率为3.25%,累积改善率为40.86%。吴贤荣等(2014)对省域农业碳排放效率的测算、动态变化及影响因素进行了全面研究。高鸣等(2014)将Malmquist指数模型与空间计量模型相结合,并面向省域农业碳排放效率展开研究,反映出区域间效率水平不均衡的问题。孙秀梅等(2016)将Malmquist指数模型应用于市域层面碳排放效率动态研究,认为应根据其技术效率变化指数与技术进步指数的实际情况采取相应的减排政策。刘金培等(2017)基于交叉效率DEA模型进行了实证研究,结果表明我国大部分地区碳排放效率呈缓慢上升趋势,其中西部地区上升速度较快。

国内外学者在碳排放效率的静态研究及动态研究两个方面形成了大量结果,为本书研究的开展提供了有力支撑。在碳排放效率的静态研究中,由于DEA模型无需对决策单元内部的生产关系预先判断,受到了广泛使用。传统的DEA模型对于相对无效程度的测度只考虑了投入与产出要素的等比例缩减或增加,没有考虑到松弛变量会对效率测度产生影响,而SBM模型则可以解决这个问题。利用传统的DEA模型进行包含非期望产出的效率测度时,需要将非期望产出变为投入要素,或者使用距离函数法、数据转换函数法或曲线测度评价法进行处理,而使用包含非期望产出的SBM模型则无须再对非期望产出另做处理。在效率测度中还会出现多个决策单元处于有效状态,其效率值均为1的情况,此时若要在决策单元间进行比较,只有使用超效率DEA模型。考虑到上述问题,本书将在全要素生产率框架下采用包含非期望产出的超效率SBM模型对碳排放效率进行静态与动态分析。但单一的SBM模型无法剔除环境因素与随机误差对效率值的影响,使效率评价结果产生偏差,基于此,弗里德等(Fried et al., 2002)提出三阶段DEA研究方法,在效率测算后引入SFA法,通过其衡量环境变化和随机误差对DEA投入指标的影响,进而将影响较大的环境因素剔除,分析此时效率测算结果同最初结果的差异。

三阶段DEA方法被提出来后在资源与环境效率评价领域得到了广泛的应用,主要体现在产业与研究地域的不同:董锋等(2014)构建三阶段DEA模型测算区域碳排放效率,并将三阶段DEA模型测算结果与经典DEA模型测算结果进行对比,发现碳排放作为环境投入指标时,前后效率出现显著性差异,与我国经济发展实际和预期结果更加吻合。同时,三阶段DEA效率测算

模型也为区域与省域之间平衡发展提供新的思路：陈钢等（2016）运用三阶段 DEA 模型对区域建筑业碳排放效率进行了评价；郭四代等（2018）基于 2006~2015 年省际区域的面板数据，采用三阶段 DEA 模型剥离了外部环境因素与随机误差因素的影响，评价了相同环境下各区域的环境效率水平差异性及其变化趋势，探讨了我国环境效率的影响因素；赵爽等（2018）利用三阶段 DEA 分析方法对长江经济带工业碳排放效率进行研究，环境变量分析前后对比结果发现优化规模，统筹区域发展，提高科技创新能力是提高长江经济带工业碳排放效率的主要途径。以上学者的研究结果均表明在效率测算过程中，随机误差与环境变量对不同地区效率值影响程度不同，深入分析可对地区发展提供指导性建议，因此利用回归方式提出环境变量对效率测评的研究是十分必要的。

1.2.2 碳排放影响机理相关研究

1.2.2.1 碳排放与行业发展关系

碳排放与经济增长之间关系的现有研究，主要集中在对碳排放的环境库兹涅茨曲线（environmental kuznets curve, EKC）和塔皮奥（Tapio）脱钩理论的探讨。在格罗斯曼和克鲁格（Grossman and Krueger, 1995）提出的用于描述经济增长与环境污染之间关系的 EKC 曲线后，部分西方学者通过一系列的验证研究发现碳排放与区域经济增长之间存在倒“U”型关系，拐点出现在人均国内生产总值 1 万~8 万美元的范围内；而对加拿大的研究发现碳排放与人均 GDP 并不相关。近年来，国内学者运用计量经济模型对我国碳排放 EKC 曲线的存在性进行了研究，林伯强等（2010）认为我国存在碳排放 EKC 曲线，在 2020 年左右达到理论拐点；胡宗义等（2015）利用非参数 EKC 模型研究发现，二者之间不存在倒“U”型曲线关系，而是近似表现为线性关系；许广月等（2010）则认为中国中部及其东部地区存在碳排放 EKC 曲线，而西部地区则不存在；邵锋祥等（2012）在原有 EKC 曲线的基础上建立模型进一步分析影响碳排放的主要因素，实证研究结果显示技术进步是抑制碳排放增加的主要因素，而经济增长是促进碳排放增加的重要驱动因素。

碳排放与经济增长“脱钩”概念由 OECD 提出并用脱钩指数来衡量经济