

CARBON EMISSIONS IN CHINA

REGIONAL DIFFERENTIATIONS,
CARBON FLOW ACROSS INDUSTRIAL SECTORS
AND MARKETS LINKAGE

中国碳排放

区域分异、部门转移与市场衔接

杨顺顺 著

科学文献出版社
SCIENCE ACADEMIC PRESS (CHINA)

杨顺顺 著

中国碳排放

区域分异、部门转移与市场衔接

CARBON EMISSIONS
IN CHINA

REGIONAL DIFFERENTIATIONS,
CARBON FLOW ACROSS INDUSTRIAL SECTORS
AND MARKETS LINKAGE



社会科学文献出版社
SOCIAL SCIENCES ACADEMIC PRESS (CHINA)

图书在版编目(CIP)数据

中国碳排放：区域分异、部门转移与市场衔接 / 杨顺顺著. -- 北京：社会科学文献出版社，2018.11
ISBN 978 - 7 - 5201 - 3784 - 3

I. ①中… II. ①杨… III. ①二氧化碳 - 排气 - 研究 - 中国 ②节能 - 经济发展 - 研究 - 中国 IV. ①X511
②F124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 256624 号

中国碳排放：区域分异、部门转移与市场衔接

著 者 / 杨顺顺

出 版 人 / 谢寿光

项目统筹 / 邓泳红 吴 敏

责任编辑 / 吴 敏

出 版 / 社会科学文献出版社 · 皮书出版分社 (010) 59367127

地址：北京市北三环中路甲 29 号院华龙大厦 邮编：100029

网址：www.ssap.com.cn

发 行 / 市场营销中心 (010) 59367081 59367083

印 装 / 天津千鹤文化传播有限公司

规 格 / 开 本：787mm × 1092mm 1/16

印 张：16.25 字 数：185 千字

版 次 / 2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

书 号 / ISBN 978 - 7 - 5201 - 3784 - 3

定 价 / 69.00 元

本书如有印装质量问题，请与读者服务中心 (010 - 59367028) 联系

 版权所有 翻印必究

国家社会科学基金青年项目“我国工业部门碳排放转移路径及减排成本分担机制研究”(13CJY051)

湖南省社会科学院智库研究专项重点课题“中国‘用能权+碳排放’双市场配额优化及衔接机制研究”(18ZHB07)

目 录

第一章 研究背景与研究框架	001
一 研究意义与研究目标	001
二 国内外研究进展评述	006
三 研究思路和总体框架	018
 第二章 基于 IPCC 清单分析法的全国分区域/部门	
碳排放核算研究	021
一 碳排放的核算方法选择	023
二 中国能耗碳排放量核算	030
三 中国工业过程碳排放量核算	037
四 本章小结	038
 第三章 基于 LEAP 模型的分区域/部门碳排放趋势情景分析	
——以长江经济带为例	041
一 LEAP 模型方法简介	045

- 二 基于 LEAP 模型的长江经济带碳排放现状核算 051
- 三 长江经济带分区域/部门碳排放趋势情景分析
(2016 ~ 2030 年) 067
- 四 本章小结 083

第四章 基于投入产出法的工业部门间碳转移路径分析

- 086
- 一 中国工业部门直接（能耗）碳排放细类核算 091
- 二 部门间碳转移评价模型（修正）及部门分类分析
..... 101
- 三 中国进出口碳转移评价模型（修正）及结果讨论
..... 113
- 四 中国工业部门间碳转移路径分析模型及结果讨论
..... 117
- 五 本章小结 122

第五章 基于 RAS 法的工业部门碳转移变动预测研究 126

- 一 基于 RAS 法的工业部门碳转移预测模型设计 127
- 二 情景假设与投入产出表预测 130
- 三 中国工业部门碳转移预测结果讨论 142
- 四 本章小结 150

第六章 纳入部门碳转移的减排成本分担及双市场衔接

- 机制研究** 152
- 一 中国用能权/节能量及碳排放交易市场建设进展 159

二 “用能权 + 碳排放权” 双市场配额配置模型设计	179
三 “用能权 + 碳排放权” 双市场配额优化及分析	188
四 “用能权 + 碳排放权” 双市场衔接机制讨论	211
五 本章小结	217
 第七章 结论与展望	222
一 研究结论	222
二 研究展望	230
 参考文献	233
 后 记	251

第一章

研究背景与研究框架

随着应对以气候变暖为主要特征的全球气候变化的举措由理论研究逐步转向实践操作，开发低碳技术、建立低碳产业、培育低碳金融、发展低碳经济成为各国推进可持续发展的共识。当前发达国家和发展中国家的碳排放空间和减排责任讨论和博弈越发敏感。我国政府先后于 2009 年哥本哈根会议、2015 年巴黎气候大会上承诺 2020 年中国碳强度较 2005 年下降 40% ~ 45%、中国将于 2030 年左右使 CO₂ 排放达到峰值、2030 年中国碳强度较 2005 年下降 60% ~ 65%。这意味着中国未来碳减排目标更加明晰、任务更加艰巨，碳减排已由国际公约博弈和协商逐步转向自我约束、自觉行动和减排路径的合理性设计。

一 研究意义与研究目标

国际能源机构（IEA）数据显示，从 2007 年开始，中国

已成为化石燃料消费造成的 CO₂ 排放的最大排放国，中国的碳减排研究也从学理争论转向具体减排方案的技术经济测度和路径优化分析，并成为国内外学界研究的热点领域。低碳转型是经济增长、产业结构、需求结构、能源结构多重维度共同驱动的结果，近年来我国工业化和城镇化加速推进的规模前所未有的，产业结构的自身演进规律和路径依赖效应，使得中长期内产业碳减排依然是中国碳减排的重中之重，其中又应以工业碳排放控制为核心和关键，^① 而我国以煤为主的能源禀赋特点，导致仅依靠能源效率和结构的自身优化作用难以抵消经济中高速发展和总量扩张拉动的碳排放增长。本研究选择工业部门碳排放为重点研究对象，一方面，中国大部分的终端能源消费和绝大部分的碳排放直接发生在工业部门；另一方面，工业部门层次的减排目标操作性强且较易为国际协商机制所接受。

本书以论证如何在中国经济增长过程中实现我国提出的碳减排目标为背景，以分区域、分部门碳排放结构分析为切入点，以量化反映碳排放趋势和部门碳排放关联为特色，寻找未来中国以工业部门为重点的碳减排可行方案，对部门间碳排放转移路径和市场化减排机制的完善进行系统研究：①从理论层面，厘清部门间隐含碳转移现状和未来发展趋势，进一步丰富国内碳排放的研究板块；②从实践层面，我国碳减排已

① 目前工业碳排放量占全国碳排放总量的比例超过 80%，本书第二章有详细论述。

不是一个“是否做”的问题，而是“如何做”的问题，国际减排合作中各国由于排放权与减排责任相互指责、争论不休已给出了足够的前车之鉴。本书以中国碳排放总量核算和分部门碳排放趋势测算为大背景展开，进一步深入剖析工业部门间碳排放转移部门特征分类、现状路径和未来演变趋势，进而提出符合一般性与碳转移责任追溯要求的减排市场衔接机制。

本研究完成的研究目标及其出发点如下。

(1) 科学选择核算方法，确定目前我国碳排放总量，并对其分（能源）品种、分区域、分部门解构，论述当前各区域、各部门碳排放的主要特征，以及以工业部门为碳排放研究重点领域的合理性。由当前社会经济和技术水平发展所处阶段决定，我国碳排放属于“生存排放”而非“奢侈排放”，未来经济发展要求和以化石能源为主的能源消费结构，决定了我国碳排放的总体规模和发展趋势，以工业部门碳强度控制为核心的减排方式，是我国低碳转型的阶段性特征和重要手段。

(2) 将清单分析方法与能源规划目标相结合，基于数据的可获取性，以我国重要的战略发展区域（长江经济带）为案例，揭示在不同的减排策略和经济增长情景下，我国发达地区、中部地区、西部欠发达地区及各行业部门碳排放在 2030 年前的变动规律，量化论证在完成国家提出的 2030 年达峰目标前，各行业部门在我国各区域的减排贡献和未来的主要控制

倾向。采用 LEAP（长程能源替代规划）模型从产业部门结构、能源消费总量、结构替代方面入手能较准确地把握我国分区域、分部门碳足迹历史特征与演变规律，形成较有特色的研究结论。事实上，在我国碳排放达峰前，工业碳排放的演变规律决定了我国碳排放的总体趋势，而能耗碳排放又在工业碳排放中处于重要地位（工业过程碳排放在远期可能产生更为重要的影响），把握工业碳排放和能耗碳排放的演变规律即把握了我国碳排放控制的关键。

（3）基于投入产出模型，实施中国工业部门间碳转移现状评价及部门分类，分析进出口碳转移盈亏，描绘中国工业部门间碳转移主导路径，从明晰责任的角度解决“为何要分担”的问题。中国相当数量的工业部门碳排放，并非用于本部门最终需求的生产，而是跟随产业链和中间需求转移到其他部门；而最终需求中也有相当可观的一部分用于支持出口而潜在影响本国福利水平。对于以直接碳排放为主的部门，应从优化能源结构、提高碳效率入手减排；对于产业链隐含碳传导而造成的高碳部门，应重点推动减量化等循环经济生产方式；对于国际贸易活跃部门，则应调整国际贸易分工角色和出口产品结构，从而实现各类高碳部门的分类管理。

（4）将投入产出模型与 RAS（双比例平衡）统计分析技术相结合，分析在惯性和达到规划目标不同情景下，我国工业部门间碳转移路径的稳定性、趋势性和内部优化动因，探讨未来工业部门间碳排放转移的变动方向和控制重点。各工业部门

存在相互的生产与消费活动，部门的隐含碳转移通过产业链将部分减排责任从上游部门转移至下游部门，从受益与责任相匹配出发，部门中受益的生产者和消费者应承担共同减排责任。减排成本分担比例既要考察责任归属，又要顾及减排能力、潜力等经济技术因素。中国以化石能源为主的能源消费结构、工业化进程和居民基本需求都需要在碳排放总量控制上不能操之过急。将部门间碳转移纳入减排策略的考量范畴时，应该综合平衡历史性的责任转移补偿，以及面向未来的责任转移控制。

(5) 在对各类碳减排机制适用性讨论的基础上，论述采用基于科斯规制的用能权/碳排放权交易机制，实现部门碳减排市场化运行的科学性和可行性，并运用部门间碳转移分析结论，对用能权/碳排放权交易机制的关键环节——配额分配机制进行量化设计，同时提出通过实施“用能权+碳排放权”双市场衔接机制进行市场完善的相关建议。相对于国际减排合作中由于国家利益冲突，对公平的关注远胜于效率的现状，国内各部门碳减排可以通过利益再分配的方法，实现公平与效率原则的协调运用。由于当前政府控制传统污染的压力高于控制碳排放，成本分担机制落实将以部门内平衡为主，政府分担和直接干预为辅。成本共同分担原则可以双向激励部门中的生产、消费方降低碳排放。碳减排优化方案是综合考虑部门承受能力、重要性、减排潜力、开放性、能源和碳效率、边际减排成本，对部门发展目标、减排约束、责任转移分摊反复权衡的结果。推进部门碳减排需要积极尝试从过多依赖行政手段向综

合应用经济市场手段转变，未来的碳减排路径将是“政策扶持、技术创新、经济激励、市场培育”相结合的结果，建立部门能耗/碳的总量/强度控制标准，是市场化机制运作的前提，政府各项制度安排将是落实减排市场机制并体现效力的重要保障。

二 国内外研究进展评述

产业部门（特别是工业部门）是能源消耗和碳排放主导部门，也是技术改造易行、成本较低的碳减排部门，国内外学界对产业部门碳减排的研究主要集中在碳排放核算方法、碳排放驱动因素、碳排放—经济增长关系、隐含碳转移评估、碳排放环境规制、碳减排工艺技术等方面。

（一）产业部门碳排放测算方法研究

要明确产业部门碳排放在国家碳排放中的贡献和影响，首先必须存在一套科学合理的估算技术。IPCC 发布的国家温室气体清单指南（IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories）给出了宏观尺度较权威的能源使用和工业过程碳排放测算方案，^① 在学界得到广泛应用，本研究主要采用该套

① IPCC, “IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Hayama: IGES for the IPCC, 2006.

排放因子。该指南中,涉及产业部门碳排放和核算的内容主要包括固定源、移动源燃烧,农业、工业、建筑业、服务业部门能耗碳排放主要参考固定源燃烧的排放因子,交通部门参考移动源燃烧的排放因子。其中,本研究对工业部门又进行了更为细致的分类测算,工业部门按门类分为能源工业、制造业两类;工业过程排放,涉及电子工业、金属工业、化学工业、采矿工业等;农业的土地利用碳排放等不属于能耗或工业过程的碳排放并未纳入本研究的核算范围。此外,美国橡树岭国家实验室^①、中国国家发改委气候变化司等机构也发布了各类能源相应的碳排放因子,一般来说能耗碳排放的排放因子在各类研究中都比较接近,但工业过程碳排放的排放因子在不同研究则差距较大(这可能与工艺技术有关)。

(二) 对影响碳排放驱动因素的考察

对影响碳排放驱动因素的考察,即考察推动中国 and 主要碳排放部门的碳排放量变动的关键因素是什么。这一研究领域由于方法相对成熟、规范,在目前工业碳排放研究中的学术报道最为集中。目前学界对碳排放驱动因素分析的主要方法有以下四类。

^① Marland G., Boden T. A., Griffin R. C., et al., "Estimates of CO₂ Emissions from Fossil Fuel Burning and Cement Manufacturing, Based on the United Nations Energy Statistics and the US Bureau of Mines Cement Manufacturing Data", ORNL/CDIAC-25, Oak Ridge National Laboratory, 1989.

1. 基于各类恒等式形式的回归分析法

此类方法将影响碳排放的因素分解为多个因素的乘积来表示，经历了从 20 世纪 70 年代 Ehrlich 和 Ehrlich 提出的 IPAT 方程（即环境负荷可用人口、人均 GDP 和技术水平表征）至 Kaya 恒等式（将温室气体排放分解为人口、经济、技术、能源因素），^① 直至随机回归影响 STIRPAT 模型等阶段，^② STIRPAT 模型克服了 IPAT 模型的同比例线性假设的缺点。国内使用 Kaya 恒等式或 STIRPAT 模型分析碳排放因素的研究很多，^③ 由于恒等式分解思路与指数分解法特征一致，Kaya 恒等式也常被用于 Divisia 方法的指标预处理步骤而联合使用。^④

2. 指数分解法

指数分解法是最成熟的一类分解技术。主要的两类指数分

-
- ① Kaya Y., “Impact of Carbon Dioxide Emission on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios”, Paris: Presentation to the Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, IPCC, 1989.
 - ② Dietz T., Rosa E. A., “Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence And Technology”, *Human Ecology Review*, 1994 (1).
 - ③ 何维达、张凯：《我国钢铁工业碳排放影响因素分解分析》，《工业技术经济》2013 年第 1 期；吴英姿、都红雯、闻岳春：《中国工业碳排放与经济增长的关系研究——基于 STIRPAT 模型》，《华东经济管理》2014 年第 1 期；李健、王铮、朴胜任：《大型工业城市碳排放影响因素分析及趋势预测——基于 PLS-STIRPAT 模型的实证研究》，《科技管理研究》2016 年第 7 期。
 - ④ 栗新巧、张艳芳、刘宏宇：《陕西省碳排放影响因素及其区域分异特征》，《水土保持通报》2014 年第 4 期；吴贤荣、张俊飏：《中国省域农业碳排放：增长主导效应与减排退耦效应》，《农业技术经济》2017 年第 5 期；王丽琼：《基于 LMDI 中国省域氮氧化物减排与实现路径研究》，《环境科学学报》2017 年第 6 期。

解法包括：19 世纪 60 年代发展出的 Laspeyres 指数（拉氏指数）法，其操作方法类似于单因素敏感性分析，最早用于企业销售业绩研究；20 世纪 20 年代提出的 Divisia 指数（迪氏指数）法，其每一个因素都对时间进行微分，又分为算术均值法（AMDI）和对数均值法（LMDI）。指数分解法相对于多元回归分析的主要优点是能克服多重共线性的问题。^① Boyd 等首次采用迪氏指数进行了工业能耗分解分析，^② Torvanger 采用迪氏指数法对影响 OECD 国家制造业碳排放的因素进行了研究，^③ 认为经济增长和能源价格上涨是碳强度下降的主要动因；Shrestha 和 Timilsina 的成果是较早涉及中国碳排放因素迪氏分解分析的研究，^④ 但 Ang 等的系列研究对国内相关研究影响最为广泛，^⑤ 其提出的迪氏指数的改进法（同时解决完全分解和零值问题，残差较大是拉氏指数法和迪氏指数法的共同问题）——对数均值 Divisia 指数法（LMDI）在国内碳排放驱动因素研究中得到了最广泛的应用。自

① Ang B. W., Zhang F. Q., “A Survey of Index Decomposition Analysis in Energy and Environmental Studies”, *Energy*, 2000 (12).

② Boyd G. A., McDonald J. F., Ross M., et al., “Separating the Changing Composition of US Manufacturing Production from Energy Efficiency Improvements: A Divisia Index Approach”, *Energy*, 1987 (2).

③ Torvanger A., “Manufacturing Sector Carbon Dioxide Emissions in Nine OECD Countries, 1973–87: A Divisia Index Decomposition to Changes in Fuel Mix, Emission Coefficients, Industry Structure, Energy Intensities and International Structure”, *Energy Economics*, 1991 (3).

④ Shrestha R. M., Timilsina G. R., “Factors Affecting CO₂ Intensities of Power Sector in Asia: A Divisia Decomposition Analysis”, *Energy Economics*, 1996 (4).

⑤ Ang B. W., Choi K. H., “Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry: A Refined Divisia Index Method”, *Energy*, 1997 (3).

Wang、Wu 等国内学者在公开文献上较早对中国碳排放影响因素进行讨论后,^① 徐国泉、王锋、陈诗一、蒋金荷、涂正革、国涓和刘长信、邵帅等多位学者均采用指数分解法对中国工业碳排放影响因素进行了分析。^②

3. 基于投入产出模型的结构分解分析法 (SDA)

相较于指数分解法, SDA 对数据要求较高, 受制于投入产出表编制时限, 只适用于跨期增量分解分析, 无法进行连续时间序列分析, 但其优势在于从需求结构出发, 对 Leontief 逆矩阵效应的分析即对部门间技术经济关联的讨论, 可以分析经济结构变动和最终需求变化导致的碳排放间接影响。^③ 目前国

① Wang C., Chen J. N., Zou J., "Decomposition of Energy-related CO₂ Emission in China", *Energy*, 2005 (1); Wu L., Kaneko S., Matsuoka S., "Driving Forces Behind the Stagnancy of China's Energy-Related CO₂ Emissions from 1996 to 1999: The Relative Importance of Structural Change, Intensity Change and Scale Change", *Energy Policy*, 2005 (3).

② 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》,《中国人口·资源与环境》2006年第6期;王锋、吴丽华、杨超:《中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究》,《经济研究》2010年第2期;陈诗一:《中国碳排放强度的波动下降模式及经济解释》,《世界经济》2011年第4期;蒋金荷:《中国碳排放量测算及影响因素分析》,《资源科学》2011年第4期;涂正革:《中国的碳减排路径与战略选择——基于八大行业部门碳排放量的指数分解分析》,《中国社会科学》2012年第3期;国涓、刘长信:《中国工业部门的碳排放: 影响因素及减排潜力》,《资源与生态学报》(英文版)2013年第2期;邵帅、张曦、赵兴荣:《中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析》,《中国工业经济》2017年第3期。

③ Hoekstra R., van der Bergh J. J. C. J. M., "Comparing Structural and Index Decomposition Analysis", *Energy Economics*, 2003 (1); 王长建、张小雷、张虹鸥等:《基于 IO-SDA 模型的新疆能源消费碳排放影响机理分析》,《地理学报》2016年第7期。