

分类号 _____
U D C _____

密级 _____
编号 _____

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

论文题目 制造业技术创新对碳排放的
产业关联溢出效应研究

研究生姓名: 张姣姣

指导教师姓名、职称: 万永坤 教授

学科、专业名称: 应用经济学 产业经济学

研究方向: 企业理论与战略管理

提交日期: 2024年5月31日

独创性声明

本人声明所呈交的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。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了谢意。

学位论文作者签名：张姣姣 签字日期：2024.5.31

导师签名：石坤 签字日期：2024.5.31

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定，同意（选择“同意”/“不同意”）以下事项：

1. 学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；

2. 学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分內容。

学位论文作者签名：张姣姣 签字日期：2024.5.31

导师签名：石坤 签字日期：2024.5.31

Research on the Industry Related Spillover Effect of Technological Innovation on Carbon Emissions in Manufacturing Industry

Candidate : Zhang Jiaojiao

Supervisor: Wan Yongkun

摘 要

自“双碳”目标宣布以来，碳排放的相关问题日益受到社会各界的高度关注。制造业作为高能耗产业，在生产活动中产生了大量二氧化碳，技术作为碳减排的一条重要路径，这时应坚持创新驱动发展，将技术创新作为全面塑造制造业发展新优势的关键抓手，加快推动制造业绿色转型。本文在对技术创新和碳排放相关文献研究进行梳理总结的基础上，通过构建技术创新、碳排放、产业关联溢出效应理论分析框架，对双碳背景下制造业技术创新对碳排放的产业关联溢出效应进行了分析；利用熵值法、碳排放系数法对制造业技术创新、碳排放效率进行了测度与分析；综合运用空间计量模型深入探究了制造业技术创新对碳排放的影响和间接溢出效应。利用社会网络分析法研究了制造业技术创新对碳排放的溢出效应大小及溢出路径。论文主要研究内容和结论如下：

（1）基于熵值法从创新投入、创新产出、创新支撑三个方面对技术创新指数构建指标体系，制造业中技术创新指数较高的行业多为高技术行业，其余的多为劳动密集型和资本密集型行业。基于碳排放系数法计算制造业 30 个行业的碳排放量，发现资本密集型行业的碳排放量远远高于技术密集型行业和劳动密集型行业。

（2）通过空间杜宾模型的估计结果发现技术创新短期内对制造业碳排放效率在总体上呈现抑制作用，也就是说短期内技术创新可增加制造业的碳排放。间接溢出效应分解发现，本行业技术创新对上下游行业的碳排放效率存在显著的正向溢出效应，也就是本行业的技术创新可以减少上下游行业的碳排放量。并且在三种技术创新水平不同的行业中发现技术创新高水平行业的技术能够对上下游行业的碳排放效率产生正向的溢出效应，也就是降低上下游行业的碳排放量，技术创新中水平行业的技术只能对下游行业的碳排放有溢出效应，对上游行业没有溢出效应。而技术创新低水平行业的技术对上下游行业产生的溢出效应均不显著。

（3）通过构造溢出效应、吸收效应矩阵发现，制造业技术创新对碳排放的溢出效应和吸收效应较高的行业为技术密集型行业。

（4）从整体来看，随着时间的推移，技术创新对制造业上下游产业之间的碳排放溢出的联系程度逐渐加强。但技术创新对下游行业碳排放的溢出效应与对上游行业的吸收效应在制造业各产业之间呈现较为不均衡的分布。从个体来看，有 7 个行业能够将自身的技术创新溢出到其下游行业从而对下游行业的碳排放产生影响，也能够从上游行业吸收到技术创新，以降低自身行业的碳排放。有 6 个行业的技术创新对下游行业碳排放

的溢出效应较大且不从上游行业中吸收溢出效应。

(5) 通过溢出效应网络图发现随着时间的推移,制造业产业之间技术创新对碳排放的溢出路径明显增加。以前两个行业为例,可从溢出效应网络图中分析出制造业技术创新对碳排放的两条具体溢出路径:①计算机、通信和其他电子设备制造业→专用设备制造业→木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业→家具制造业②电气机械和器材制造业→通用设备制造业→纺织业→纺织服装、服饰业。

关键词: 制造业 技术创新 碳排放 产业关联溢出效应

Abstract

Since the announcement of the "dual carbon" target, the issue of carbon emissions has increasingly received high attention from all sectors of society. As a high-energy consuming industry, manufacturing generates a large amount of carbon dioxide in production activities. Technology is an important path for carbon reduction. At this time, we should adhere to innovation driven development, take technological innovation as a key lever to comprehensively shape new advantages in manufacturing development, and accelerate the green transformation of manufacturing. Based on a review and summary of literature on technological innovation and carbon emissions, this article constructs a theoretical analysis framework for technological innovation, carbon emissions, and industrial spillover effects, and analyzes the spillover effects of technological innovation on the manufacturing industry under the dual carbon background; We measured and analyzed manufacturing technology innovation and carbon emission efficiency using entropy method and carbon emission coefficient method; We comprehensively utilized spatial econometric models to explore the impact and indirect spillover effects of technological innovation on carbon emissions in the manufacturing industry. The social network analysis method was used to study the spillover effects and pathways of technological innovation on carbon emissions in the manufacturing industry. The main research content and conclusions of the paper are as follows:

- (1) Based on the entropy method, an index system for technological

innovation index is constructed from three aspects: innovation input, innovation output, and innovation support. In the manufacturing industry, the industries with higher technological innovation index are mostly high-tech industries, while the rest are mostly labor-intensive and capital intensive industries. Based on the carbon emission coefficient method, the carbon emissions of 30 manufacturing industries were calculated, and it was found that the carbon emissions of capital intensive industries were much higher than those of technology intensive and labor-intensive industries.

(2) The estimation results of the spatial Durbin model show that technological innovation has an overall inhibitory effect on the carbon emission efficiency of the manufacturing industry in the short term, which means that technological innovation can increase the carbon emissions of the manufacturing industry in the short term. The decomposition of indirect spillover effects reveals that technological innovation in this industry has a significant positive spillover effect on the carbon emission efficiency of upstream and downstream industries, which means that technological innovation in this industry can reduce the carbon emissions of upstream and downstream industries. And in three industries with different levels of technological innovation, it was found that technology in industries with high levels of technological innovation can have a positive spillover effect on the carbon emission efficiency of upstream and downstream industries, that is, reduce the carbon emissions of upstream and downstream industries. Technology in industries with medium levels of technological innovation can only have a spillover effect on the carbon

emissions of downstream industries, but there is no spillover effect on upstream industries. However, the spillover effects of technology from industries with low levels of technological innovation on upstream and downstream industries are not significant.

(3) By constructing a spillover and absorption effect matrix, it was found that the industries with high spillover and absorption effects of manufacturing technology innovation on carbon emissions are technology intensive industries.

(4) Overall, with the passage of time, the degree of connection between technological innovation and carbon emission spillovers between upstream and downstream industries in the manufacturing industry has gradually strengthened. However, the spillover effect of technological innovation on carbon emissions in downstream industries and the absorption effect on upstream industries show a relatively uneven distribution among various manufacturing industries. From an individual perspective, there are 7 industries that can overflow their technological innovation to their downstream industries, thereby affecting their carbon emissions. They can also absorb technological innovation from upstream industries to reduce their own carbon emissions. Six industries have significant spillover effects of technological innovation on carbon emissions in downstream industries and do not absorb spillover effects from upstream industries.

(5) Through the spillover effect network diagram, it was found that over time, the spillover path of technological innovation between manufacturing industries on carbon emissions has significantly increased. Taking the previous two industries as examples, two specific spillover paths of technological

innovation on manufacturing carbon emissions can be analyzed from the spillover effect network diagram: ① computer, communication, and other electronic equipment manufacturing → specialized equipment manufacturing → wood processing and wood, bamboo, rattan, palm, and grass products industry → furniture manufacturing industry ② electrical machinery and equipment manufacturing industry → general equipment manufacturing industry → textile industry → textile and clothing industry.

Keywords: Manufacturing; technology innovation; carbon emissions; industry related spillover effects

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义.....	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 技术创新的相关研究.....	2
1.2.2 技术创新对碳排放的影响.....	3
1.2.3 文献述评.....	5
1.3 研究的主要内容与方法.....	5
1.3.1 研究的主要内容.....	5
1.3.2 研究方法.....	8
1.4 本文的创新与不足.....	8
1.4.1 本文可能的创新.....	8
1.4.2 本文的不足之处.....	8
2 理论分析	10
2.1 概念界定.....	10
2.1.1 技术创新溢出.....	10
2.1.2 碳排放.....	10
2.1.3 产业关联溢出效应.....	11
2.2 制造业技术创新对碳排放影响的理论基础.....	11
2.2.1 技术创新对本行业碳排放的影响途径.....	11
2.2.2 技术创新对上下游产业碳排放的溢出效应.....	12
3 制造业技术创新指标、碳排放指标的测算方法及指标选择	14
3.1 制造业技术创新指标测算.....	14
3.1.1 技术创新指标的测算方法.....	14
3.1.2 技术创新指标的选择.....	14
3.1.3 技术创新指标测算结果的对比分析.....	15

3.2 制造业碳排放指标测算	17
3.2.1 碳排放的测算方法	17
3.2.2 碳排放的指标选择	17
3.2.3 碳排放指标测算结果的对比分析	19
4 制造业技术创新对碳排放的产业关联溢出效应实证检验	21
4.2 空间计量模型的设定	21
4.1 计量模型的设定与数据来源	21
4.1.1 变量选取	21
4.1.2 数据来源及变量的描述性统计	22
4.2.1 空间权重矩阵设定	22
4.2.2 全局空间自相关检验	23
4.2.3 局部空间自相关检验	23
4.2.4 空间计量模型	24
4.2.5 实证结果分析	24
4.3 技术创新对碳排放的产业关联溢出效应实证分析	29
4.3.1 模型结果分析	29
4.3.2 产业关联溢出效应分析	31
4.4 稳健性分析	33
4.5 异质性分析	34
5 制造业技术创新对碳排放的产业关联溢出效应大小及路径分析	36
5.1 技术创新对碳排放的溢出效应大小分析	36
5.1.1 模型构建	36
5.1.2 结果分析	37
5.2 制造业技术创新对碳排放的溢出路径分析	39
5.2.1 数据说明与方法介绍	39
5.2.2 结果分析	40
6 结论与建议	47
6.1 结论	47
6.2 建议	48

参考文献	50
致谢	54

1 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

近年来，全球变暖的威胁日益凸显，其背后的主要推手是不断攀升的碳排放量，这导致了极端天气事件频发。为了有效遏制全球变暖及其带来的严重后果，降低碳排放已成为刻不容缓的任务。在中国，虽然经济快速发展，但环境保护方面在过去一定程度上被忽视，导致了较高的碳排放水平。根据国家统计局的数据，2021年，中国能源消费结构仍以煤炭为主，其占比高达56%，消耗的标准煤总量达到惊人的52.4亿吨。进一步观察，我们发现制造业是主要的能源消费部门，其消耗的能源总量约占全国总量的37%，高达15.87亿吨标准煤。这些数据揭示了一个事实：中国的制造业在很大程度上仍然依赖于资源消耗来获取经济效益。然而，煤炭的大量燃烧会释放大量二氧化碳，这无疑加剧了全球变暖的进程。因此，中国制造业减少对煤炭的依赖，对于减缓全球变暖具有重要意义。

为解决碳排放所导致的环境问题，中国出台了一系列的政策措施，党的二十大报告明确指出，“推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节”。习近平总书记强调，制造业高质量发展是我国经济高质量发展的重中之重。随着“双碳”目标的逐步推进，推动传统制造业减少碳排放是推动建设现代化产业体系的重要驱动力，已成为影响我国经济高质量发展的关键。

技术创新在制造业碳减排中扮演着至关重要的角色。它不仅能够改变行业内的生产经营模式，还能显著提升能源利用效率（万攀兵等，2021）。通过技术革新，企业可以在维持同等产量的同时，减少能源消耗，进而降低碳排放。对于拥有技术创新能力的行业而言，这种创新不仅限于自身内部，还具有显著的溢出效应。由于技术的非排他性特点，通过合作、贸易等多种方式，这些先进技术可以被其上下游行业吸收和应用。这种技术创新的溢出不仅有助于提升整个产业链的技术水平，还能推动相关产业实现产业升级，提高能源使用效率，进而减少碳排放。值得注意的是，制造业的技术创新不仅受到本行业研发投入和创新环境的影响，同时也会受到其他行业技术溢出的影响。因此，发挥产业间技术创新的溢出效应，能够带动上下游相关行业的技术创新，从而提高上下游

行业的能源利用效率，减少碳排放。

因此，本文将从整体上把握中国制造业技术创新、碳排放现状，基于技术创新和制造业碳排放、产业关联溢出效应的理论，实证检验制造业技术创新对碳排放的影响，研究技术创新对碳排放产业关联溢出效应的大小和路径。通过给出具有针对性的对策建议，探索出一条生态优先、绿色发展的现代化道路，实现制造业的低碳发展，有力推进中国生态文明建设。

1.1.2 研究意义

(1) 理论意义。从技术创新角度出发，研究其对制造业碳排放的产业关联溢出效应的文献还比较少，即使有从上述角度进行研究的文献，这些文献也更多的是从地区层面来研究。本文从中观视角研究制造业技术创新对碳排放的产业关联溢出效应及路径，一定程度上丰富了技术创新与碳排放之间的关系。

(2) 现实意义。对我国制造业技术创新指数及碳排放进行测算，有助于从整体上掌握我国制造业技术创新发展和碳排放的历程、现状和演化趋势，从而认识到当前我国制造业技术创新水平和碳排放中存在的问题，有利于找出制造业的不足与短板；对技术创新影响制造业碳排放的理论进行分析和实证考察，并研究制造业技术创新对碳排放的产业关联溢出效应，以期丰富产业关联溢出路径的研究，为制造业利用新技术实现绿色低碳发展提供决策参考。

1.2 国内外研究综述

1.2.1 技术创新的相关研究

(1) 熊彼特创新理论

“创新”这一词汇在经济学中最早由熊彼特所提出，随后，“创新”一词在政治和社会等领域引发了激烈的讨论。熊彼特所说的“创新”是指生产要素和生产条件在原来的生产组合被打乱之后形成新的组合，这个过程也是生产函数的建立。他认为创新就是对企业内资源和企业外资源进行重新分配的过程，也是对企业未利用到的新资源进行挖掘的过程。熊彼特所说的创新包含五个方面：新产品、新生产方法、新市场、新的原材料供应商、新组织，这五个方面分别对应后人所提出的产品创新、技术创新、市场创新、

资源配置创新、组织创新。本文所说的技术创新对应熊彼特所提出新生产方法。

(2) 新熊彼特学派的技术创新理论

新熊彼特学派的代表人物之一卡曼、施瓦茨从市场竞争角度对技术创新进行了深度剖析，研究了市场结构与技术创新的关系，这里的市场结构包含三个方面：市场竞争强度、企业规模、垄断强度。他认为介于垄断和完全竞争之间的市场结构最有利于技术创新，与熊彼特理论相比较，卡曼、施瓦茨的研究更加深入具体。

(3) 国家创新系统学派的技术创新理论

该学派认为技术创新与企业无关，与国家创新系统有关，企业不是通过自发的行为去合理配置资源进行研发活动，而是通过国家创新系统与其他组织进行合作，来推动创新的引进、扩散及应用，以提高企业乃至整个国家的技术创新水平。

(4) 近代学者对技术创新的理解

技术创新可以让企业在众多具有同质化产品的企业中保持其内在的核心竞争力，维持其品牌屹立不倒。技术创新这一概念最早由著名学者熊彼特提出，后来的学者也纷纷提出自己对于技术创新这一概念的新理解，如 Mary, Marina (2010) 提出技术创新就是在生产过程中学习、吸收、应用新知识，以产生新产品供消费者消费，技术创新的整个流程做到了产品更新、生产流程更新、消费者体验更新。国内学者柳卸林 (1993) 的观点和 Mary, Marina 的有相似之处，他也认为技术创新的本质是新技术的产生和应用，但这种创新是一种思想上的创新，这种思想包括了产品从研发到生产再到出售的过程。许庆瑞 (2000) 也认为，技术创新是从新思想开始，从设计到生产再到运营的商业化过程，且该商业化的扩散也被看成技术创新。傅家骥 (1999) 则认为技术创新是理性的企业家重新分配生产要素，在新的市场上出售使用新方法生产出的新产品的一系列的过程。

而本文的技术创新是指旨在创造和应用新技术的一系列活动，这些活动基于科学技术知识及其所衍生的资源。技术创新涵盖了生产技术的革新，不仅涉及新技术的研发，还包括对现有技术进行优化和应用上的创新，以推动产业发展和技术进步。

1.2.2 技术创新对碳排放的影响

随着“双碳”目标的提出，我国越来越重视绿色发展、低碳发展，同时技术创新能否成为低碳发展的一条路径，越来越受到广泛的关注。从现有文献进行总结，技术创新对碳排放的影响主要存在积极 (Goulder 等, 1999) 和消极 (Yang, 2017) 的两面。积极方面是指技术创新提高了生产效率，进而减少化石能源的消费，从而降低二氧化碳的

排放 (Ooba 等, 2015)。林善浪等 (2013) 从时间趋势上证实了技术创新能够提高区域碳生产率, 降低二氧化碳的排放, 但不同区域的反应呈现出异质性。卢娜等 (2019) 研究发现技术创新中的突破性低碳技术能够显著降低一个地区的碳排放, 但对相邻地区碳排放的作用并不显著。Driessen 和 Hillebrand (2002) 通过深入研究技术利用和技术扩散的过程, 成功证明了技术创新在减少二氧化碳等温室气体排放方面的显著效果, 这对于生态环境的改善具有积极的意义。同样, Zwaan (2002) 等人则采用了一种不同的研究方法, 他们构建了一个针对气候变化的宏观经济模型, 以探究技术进步对二氧化碳排放量和碳税政策的具体影响。他们的实证研究结果表明, 技术创新是实现碳减排的有效途径, 能够有效降低大气中的二氧化碳浓度。孙振清等 (2020) 研究发现在技术创新方面的投入能够降低二氧化碳的排放, 且该作用存在区域异质性。刘婧玲, 陈艳莹 (2023) 认为双碳目标实现的动力是数字技术, 并且中国城市的碳排放强度的降低也与数字技术的发展有关, 这种碳减排效应也随着时间的推移逐渐增强。Xu 等 (2022) 从投资视角进行研究, 也认为技术创新能够提高碳排放效率, 降低碳排放。陈晓红等 (2021) 认为发展数字技术在当前数字经济时代中是实现碳中和目标的最好方式。魏巍贤, 杨芳 (2010) 对影响二氧化碳的因素进行了研究, 研究发现技术进步对碳减排有重要作用, 自主研发技术相较于引进的技术对碳减排的作用更弱一些。李凯杰, 曲如晓 (2012) 的研究也表明技术进步能够促进碳减排, 但长期的技术进步才会降低二氧化碳的排放量, 短期的技术进步对二氧化碳的排放没有显著性的影响。

消极方面是指技术创新在提高产品生产效率的同时, 产品的单位成本降低, 消费者的需求扩大, 厂商增加生产, 从而需要更多的能源消耗, 这样反而会增加二氧化碳的排放量 (Kumar, 2009)。这主要是技术创新引起了“能源的回弹效应”进而引起“二氧化碳的回弹效应”。杨浩昌, 钟时权, 李廉水 (2023) 研究表明绿色技术创新对碳排放存在“回弹效应”, 且发明型技术创新的二氧化碳的回弹效应要大于改进型技术创新。Acemoglu (2012) 等认为当技术创新不包含绿色技术时, 会带来二氧化碳排放量的增加。金培振 (2014) 研究表明技术创新所减少的二氧化碳不能抵消掉回弹过程中所增加的二氧化碳, 所以总体来讲, 二氧化碳的排放量还是增加的。龚利, 屠红洲, 龚存 (2018) 研究表明, 技术进步也增加了二氧化碳的排放, 这主要是因为当前技术发展水平太低, 还未达到能使二氧化碳降低的临界值。

1.2.3 文献述评

通过研究文献发现，一个行业的技术创新会影响该行业的碳排放，但一个行业的技术创新是否会影响到上下游行业的碳排放？对此方面进行研究的文献还不太丰富，现有的研究大多处于理论阶段。也有一部分文献虽然分别对制造业技术创新、碳排放进行了研究，但仍存在不足之处。一是，部分学者仅从理论上进行分析，用实证模型进行检验的相关文献较少。二是，对于区域层面制造业碳排放的分析较多，但从细分行业视角进行研究的文献较少。三是，大多学者在研究产业关联溢出效应时关注了影响机制但并未给出溢出路径。因此本文将结合空间计量模型、社会网络分析对制造业技术创新影响碳排放做出解释，对制造业技术创新影响碳排放的产业关联溢出效应进行实证检验，结合社会网络分析法得出产业关联溢出效应的大小和具体的产业关联溢出路径。

1.3 研究的主要内容与方法

1.3.1 研究的主要内容

本文主要围绕制造业技术创新对碳排放的产业关联溢出效应及路径展开深入研究。首先，从理论上对技术创新影响制造业碳排放做出分析；其次，利用 2013—2020 年我国 30 个制造业细分行业（参照《国民经济分类（2017）》目录的 C 部分，由于废弃资源综合利用业的各项数据均有缺失，故将此剔除）的数据构建技术创新和制造业碳排放的指标，并从不同维度作出分析，借助空间计量模型分析二者之间的关系和对上下游产业的关联溢出效应；再次，利用溢出效应矩阵和吸收效应矩阵对一个行业的技术创新对其上下游行业碳排放的溢出效应和吸收效应进行测算，利用社会网络分析法得到具体的产业关联溢出效应路径；最后，根据前文讨论的结果，提出促进制造业技术创新和抑制碳排放的对策建议。

本文共分为六部分，具体内容安排如下：

第一部分，绪论。主要阐述研究背景、意义，研究文献，绘制技术路线图，对技术创新及碳排放存在的问题进行简要分析。

第二部分，理论分析。本章的内容主要是介绍全文的理论基础及影响机制。涉及的主要理论基础有：技术创新理论、碳排放理论、产业关联溢出效应的理论。同时，对技术创新影响制造业碳排放的产业关联溢出效应的过程进行分析。

第三部分，我国制造业技术创新、碳排放的测度评价。技术创新指标通过创新投入、创新产出、创新支撑三个方面构建评价指标体系，创新投入选取各行业 R&D 人员、R&D 经费投入衡量；创新产出选取各行业发明专利申请数、创新产品的销售收入衡量；创新支撑选取研究与试验发展项目数衡量。采用熵值法计算我国制造业各行业技术创新指标。行业的碳排放量用碳排放系数计算公式计算，碳排放指标采用碳排放效率（行业主营业务收入/行业碳排放量）衡量，并对二者予以评价。

第四部分，制造业技术创新对碳排放的产业关联溢出效应分析。建立空间计量模型分析技术创新对制造业上下游行业碳排放的产业关联溢出效应，并对溢出效应进行分解，主要分解为间接效应，从间接效应来看一个行业的技术创新对其上下游行业碳排放的溢出效应，并对模型做稳健性分析以及异质性分析。

第五部分，制造业技术创新对碳排放的产业关联溢出路径分析。利用近三年的投入产出表、制造业碳排放数据、R&D 经费内部支出数据构造溢出效应矩阵，吸收效应矩阵，测算制造业技术创新对碳排放的溢出效应大小和吸收效应大小，再运用社会网络分析法归纳出制造业技术创新对碳排放的产业关联的溢出路径。

第六部分，主要结论及相关政策建议。根据前文讨论的结果，提出促进技术创新和抑制制造业碳排放的对策建议。

本文的框架图见图 1.1。

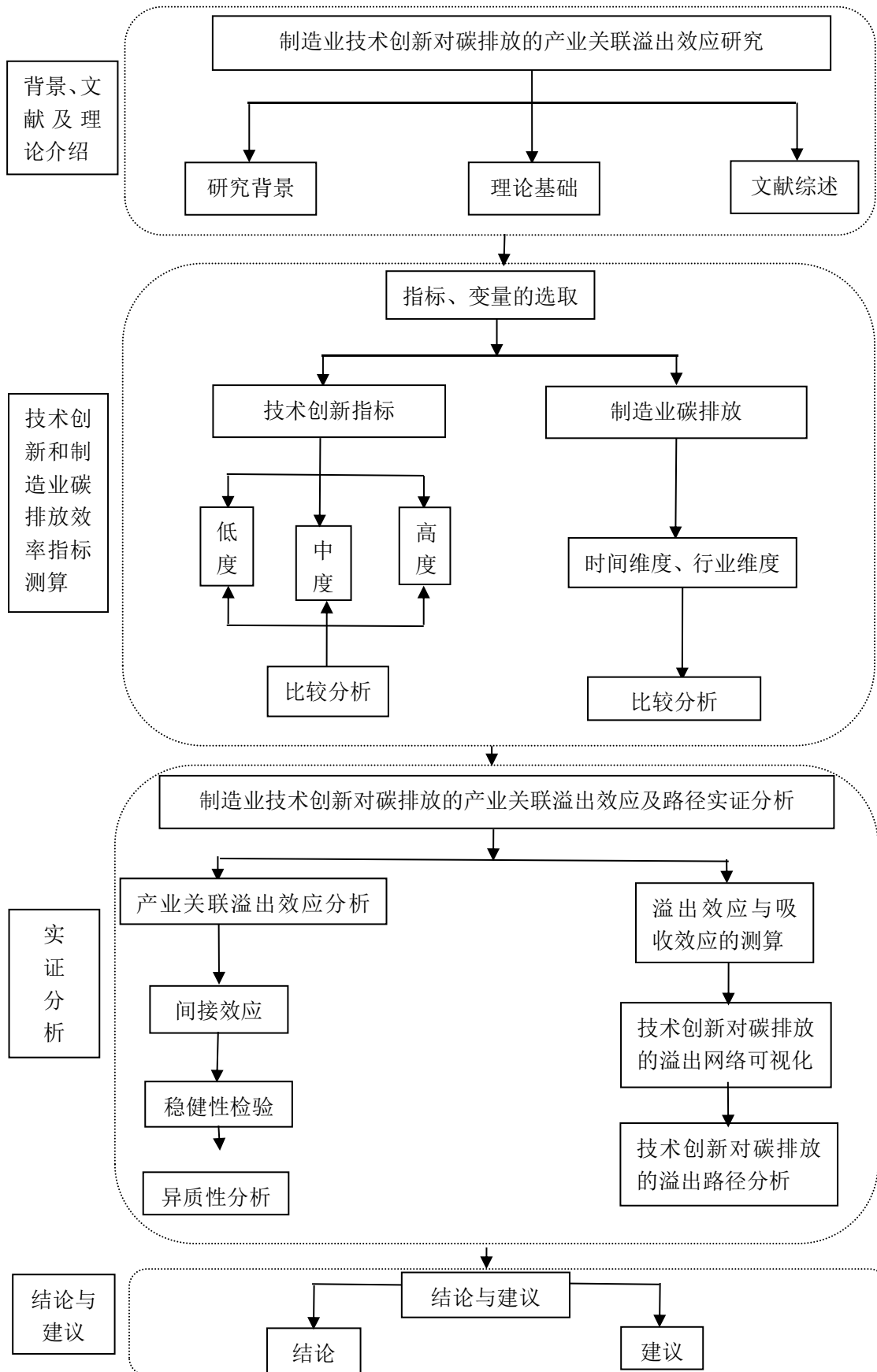


图1.1 研究框架图

1.3.2 研究方法

(1) 文献分析法。通过阅读和梳理制造业技术创新、碳排放等相关文献，明晰技术创新、碳排放、产业关联溢出效应等理论的内涵和研究现状，在这个基础上去搜集所需数据进行定量分析。

(2) 比较分析方法。本文对我国制造业各行业的技术创新及碳排放量进行测度，并对两个指标的数值分别进行比较分析。

(3) 实证分析。先是构建指标体系，利用熵值法计算技术创新指标，根据碳排放系数公式计算制造业的碳排放量，用主营业务收入/碳排放量得到碳排放效率指标；再利用空间计量模型分析一个制造业行业技术创新对制造业上下游行业碳排放的产业关联溢出效应，并分解为间接效应进行研究；最后利用社会网络分析法具体分析制造业产业关联溢出效应和吸收效应的大小及溢出路径。

1.4 本文的创新与不足

1.4.1 本文可能的创新

(1) 本文研究视角上的创新

目前大多文献从区域视角来研究制造业技术创新对碳排放的空间溢出效应，本文将从行业视角研究二者之间的产业关联溢出效应。

(2) 溢出路径分析上的创新

现有文献集中于作用机制上面，而对溢出路径的研究很少，本文将结合社会网络分析法研究制造业技术创新对碳排放的产业关联溢出路径，并作出可视化的溢出网络图。

1.4.2 本文的不足之处

(1) 数据时间跨度不长

由于受统计口径及行业分类不断调整的影响，行业名称在 2013 年前后不统一，文中采用了较新的数据，数据的时间跨度为 2013—2020 年，时间跨度较短。

(2) 指标体系有待进一步完善

目前衡量技术创新和碳排放效率的测量方法较多，但并无权威的方法。技术创新指

标的测算方法每一种都各有优缺点，本人结合前人研究对技术创新构建了指标体系，但指标体系可能不够完备，需要进一步完善。在计算碳排放效率时首先需计算出碳排放量，燃烧能产生二氧化碳的能源有很多种，但由于数据缺失，本文仅计算了 8 种能源的碳排放量，后续的研究中仍需不断完善。

2 理论分析

2.1 概念界定

2.1.1 技术创新溢出

由于技术创新的非排他性，一个经济体的技术创新可以在另一个经济体未支付成本的情况下被另一个经济体所吸收，这种经济现象就叫做技术创新溢出（王敏，2014）。技术之所以存在潜在的溢出效应，是因为技术可转移、非竞争、非排他和具备多种载体形式的特点（潘文卿，2011）。技术创新溢出的发生也受到多种条件的限制，包括地理邻近条件、经济联系程度和技术相似性等，这些条件在不同的情况下对技术创新溢出产生不同的影响（王庆喜，2013）。在技术创新溢出的过程中，技术创新的外部性主要通过新技术的传播所显示，随着新技术的传播，新技术逐步被广泛运用，这样技术创新水平才能从整体上提高（程晨，2017）。所以，技术创新溢出能够使得整个社会的技术向前发展，拥有技术创新的企业不仅促进了自身的发展，由于技术创新溢出的存在，更对其他企业产生了积极的示范效应，使得这些企业能够吸收和应用先进技术，从而加快整个行业的技术进步。杨友才等人（2020）更是证实了以上观点，他们认为产业之间的紧密联系和高度关联性，对于高技术产业间技术创新效率的相互溢出具有显著的促进作用。这种溢出效应有助于实现国家对某一特定产业技术创新资助的广泛覆盖，从而惠及多个产业的技术创新。

结合众多学者对技术创新溢出的深入研究，我们将技术创新定义为：由于技术具有一定的外部性，当技术创新主体的先进技术被技术相对落后的行业所采纳和吸收时，能够推动后者的技术进步，进而提升整个技术生态系统的创新能力。

2.1.2 碳排放

碳排放不仅仅指我们平常所了解到的二氧化碳的排放，它主要包含了六种可造成气候变暖的气体，有二氧化碳、氧化亚氮、全氟碳化物、甲烷、六氟化硫和氢氟碳化物等，但由于在这六种气体中二氧化碳所占的比重是最高的，达到了 95%，所以从狭义上来讲我们将碳排放看成二氧化碳的排放。

当前所处的时代是新技术正在爆发的时代，新技术在提高制造业生产率的同时也带

来了更多的能源消耗，这使得大气当中的二氧化碳气体所占比重增大，极端天气出现的频次有所提高，降低碳排放刻不容缓。

2.1.3 产业关联溢出效应

产业关联溢出效应是指在产业之间日常的交流和合作中，产业之间能够相互借鉴经验、技术等，当这些经验、技术等流入到上下游企业之后，可以改变上下游企业的身产方式或服务模式，从而实现溢出。产业关联溢出一般包括两种类型：前向关联溢出、后相关联溢出。前向关联溢出指的是向下游行业的溢出，强调了一个产业如何通过其产品的应用，与下游产业形成紧密的关联网络。后向关联溢出指的是向上游行业的溢出，是产业生产过程中对上游产业产品的依赖所形成的关联效应。

2.2 制造业技术创新对碳排放影响的理论基础

2.2.1 技术创新对本行业碳排放的影响途径

由研究综述部分制造业技术创新与碳排放关系可知，技术创新对于抑制碳排放具有显著作用。这种作用主要通过提升能源利用效率和优化能源结构两大路径得以实现。

技术创新首先聚焦于提升能源利用效率。通过发展新技术，传统制造业长期使用的成熟技术被打破，新技术能够提高生产效率，在维持产量不变的情况下，所需要的能源消耗量更少，减少了碳排放。若新技术和绿色技术相关，就能使制造业能够更加高效地利用能源，减少不必要的化石能源的消耗，一些清洁能源的运用更是代替了传统化石能源，从源头上减少了碳排放。

其次，技术创新通过优化能源结构减少碳排放。近年来，一些绿色新技术使得清洁能源得到广泛应用，改变了传统制造业中以煤炭为主的能源结构，推动传统的能源结构向绿色低碳化转型，能源结构的转型使得制造业碳排放得到有效控制，制造业的发展更加绿色化、低碳化。

另外，技术创新也可能使行业碳排放增加，这是由于能源的回弹效应，即产量增加所引发的碳排量增加超过了因技术创新所减少的碳排放部分（徐德义等，2020）。技术创新发生后，导致该行业单位产品的能耗降低，产品的成本也随之降低，因此该产品的价格就会随之降低，进而会导致消费者对该产品的市场需求量上升，因此企业就会扩大

生产规模，产品的生产总量上升，从而导致能源消耗总量上升，因为规模扩张导致的能源消耗超过了因为效率提升导致的能耗下降的部分，进而使得碳排放总量会增加。

此外，还有一种可能是技术创新多存在于大型企业，我国中小企业很难实现自主创新，因为中小企业技术设备落后、高层次人才短缺、科研创新资金不足，这使得中小企业只能通过向大型企业购买技术才能实现技术上的创新，但在新技术产生的短期内购买价格极高，这迫使中小企业不得不沿袭原来的生产发展路径，很难在技术上取得突破。即使中小企业获得了新技术，但由于这些企业缺乏发展高端产业链的条件，生产效率较低的产品会浪费掉有限的资源，造成扭曲的生产要素的配置，从而增加二氧化碳的排放。

综上所述，技术创新可以通过提升能源利用效率、优化能源结构降低本行业的碳排放，但也有可能因为能源的回弹效应使得一个行业的碳排放增加，故技术创新如何影响本行业碳排放，有待验证。

2.2.2 技术创新对上下游产业碳排放的溢出效应

在经济体系之中，各产业部门并不能独立完成整个生产过程，它们必定会和上下游产业有所联系，比如生产过程用到上游产业所生产的原材料，亦或者是给下游产业提供间接产品，进而参与其他产业的经济循环。因此，我们不能将某一产业视为孤立的经济单元，而必须全面考虑其与其他产业间的相互影响。这要求我们从整体视角出发，对某一产业及其关联产业进行综合分析。产业关联理论也就是通过量化方法研究某一产业如何与上下游产业在技术等方面进行交互，对上下游行业的发展产生影响。

(1) 技术创新的前向关联理论

技术创新的前向关联理论强调了一个产业如何通过其产品的应用，与下游产业形成紧密相关的网络。在这种网络中，技术创新可以进行传递，从某一产业依次传到它的下游行业，从而下游行业也发生技术创新。技术创新向下游行业的溢出可能会带来产业的扩张，也可能使某一部分产业收缩，这样使得能源消耗规模增加或能源结构随之发生改变，从而使得碳排放也发生相应的变化。具体而言，当一个产业的技术创新能够使产品整体的质量、性能提升，或单位成本下降，下游产业会因原材料质量、性能的提升，或单位成本的下降优化自己的生产流程，能源利用效率提高或能源利用结构改善，生产过程中的碳排放随之发生相应的改变。

由此可见，产业间这种前向关联效应不仅有助于提升自身的技术水平，还能通过产

业溢出效应促进相关产业的技术迭代与产业升级，正是技术创新的溢出特性，这些前向关联的产业才可能将这一创新势能进一步扩散至更广泛的领域，进而驱动整个经济体系的技术进步与产业升级，从而对碳排放产生了相应的影响，为经济的可持续发展注入了源源不断的动力。

（2）技术创新的后向关联理论

技术创新的后向关联理论指的是某一产业在生产过程中与上游产业形成的关联效应，也就是说当某一个产业发生技术创新时，对上游供应商行业所提供的原材料的要求可能也会随之提高，上游行业不得不进行创新上游行业吸收到新技术并应用到下游行业中间产品的生产时，能源消耗规模或能源结构都会发生改变，从而使得上游行业的碳排放也发生改变。

综上所述，产业间技术溢出是一个复杂的过程，关联产业间技术溢出的主体可能会通过信息和物质交流进行互通资源、自我结构调整，技术溢出的主体可以不断积累经验，以实现系统化地转型与升级，从而影响各产业部门的碳排放。

3 制造业技术创新指标、碳排放指标的测算方法及指标选择

3.1 制造业技术创新指标测算

3.1.1 技术创新指标的测算方法

鉴于技术创新是一个无形的变量，对技术创新水平的度量仍没有统一方法。国内外学者关于技术创新的测算方法主要有如下两种：

(1) 单一指标法。唐松，伍旭川，祝佳（2020）用企业专利数来衡量企业的技术创新水平，Lin M 和 YangY（2011）同样使用了专利数衡量了技术创新的能力，只不过这两位学者是针对区域创新能力做的衡量。吕平和袁易明（2020）对专利授权数做了变形，用专利授权数与人口数的比来代表创新能力。也有使用绿色专利申请数来衡量技术创新能力的，例如熊广勤等人（2020）和徐佳和崔静波（2020）。还有部分学者使用研发数据来衡量技术创新，明娟和卢小玲（2021）和 LiX 和 MaD（2021）都使用了研发支出来衡量技术创新。

(2) 构建指标评价体系法。大部分学者从创新的投入和产出两个方面选取指标来构建评价体系，张杰等（2016）从创新的投入和产出方面入手，采用 R&D 经费内部支出的增长率和专利授权申请数的增长率两个指标来进行衡量，张竣喃等（2020）则采取三个评价指标（研发人员数量、研发经费投入和研发经费支出）构建评价体系来衡量技术创新的水平，除了从投入和产出两个方面来衡量外，徐建中等（2014）增加了三个方面，这三个方面分别为社会效益方面、经济效益方面和生态效益方面，这也使得技术创新的评价体系构建更为全面。

3.1.2 技术创新指标的选择

本文采用构建指标评价体系法，参考周剑（2018）、宋培等（2023）、赵巧芝等（2023）众多学者的做法，技术创新通过创新投入、创新产出、创新支撑三个方面构建评价指标体系，创新投入选取各行业 R&D 人员、R&D 经费投入衡量；创新产出选取各行业发明专利申请数、创新产品的销售收入衡量；创新支撑选取研究与试验发展项目数衡量。采用熵值法计算我国制造业各行业技术创新指标。具体参考表 3.1。

表 3.1 制造业技术创新综合指数评价指标

一级指标	二级指标	指标类型
创新投入	R&D 人员	正向
	R&D 经费投入	正向
创新产出	发明专利申请数	正向
	创新产品的销售收入	正向
创新支撑	研究与试验发展项目数	正向

具体测算方法如下：

第一步：数据标准化，因为本文使用的指标均为正向指标，具体正向指标公式为

$$X^* = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}$$

Z_i 指的是标准化之后的数据值，这样做的优点是消除量纲和单位差异。

第二步：标准化后 X 的比重为：

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}^*}{\sum_{i=1}^n X_{ij}^*}$$

第三步：计算指标熵值：

$$e_j = -K \sum_{n=1}^n (P_{ij} \times \ln P_{ij})$$

第四步：计算第 i 项指标的信息效用值：

$$d_j = 1 - e_j$$

第五步：计算权重，得到各变量权重

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}$$

第六步：计算得分

$$\text{Score} = \sum_{j=1}^n (W_j \times X_{ij}^*)$$

熵值法作为一种客观赋权方法，显著地克服了主观因素的影响，从而确保了评估结果的客观性和准确性。该方法得出的综合评价指数数值范围限定在 0 至 1 之间。指数值越高，则意味着一个行业的技术创新能力越强。

3.1.3 技术创新指标测算结果的对比分析

从表 3.2 可以看出在制造业各行业中技术创新指数最高的三个行业分别为：计算机、

通信和其他电子设备制造业、电气机械和器材制造业、汽车制造业。三个行业 2013—2020 年的平均综合指数分别为：0.598、0.384、0.283。技术创新指数较高的多为技术密集型行业。

按照技术创新综合指数对行业分为三类，第一类为平均综合指数排名 1-10 的行业，将其命名为技术创新高水平行业，高水平行业包含：计算机、通信和其他电子设备制造业、电气机械和器材制造业、汽车制造业等行业。第二类为平均综合指数排名 11-20 的行业，将其命名为技术创新中水平行业，中水平行业包含：非金属矿物制品业、橡胶和塑料制品业、有色金属冶炼和压延加工业等行业。第三类为平均综合指数排名 21-30 的行业，将其命名为技术创新低水平行业，低水平行业包含：石油、煤炭及其他燃料加工业、酒、饮料和精制茶制造业、化学纤维制造业等行业。并且从三类行业中可以看出，综合指数较高的多为高技术行业，其余的多为劳动密集型和资本密集型行业。

表 3.2 2013—2020 年中国制造业各行业技术创新综合指数表

序号	行业	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	平均 值	排 名
1	农副食品加工业	0.041	0.047	0.051	0.059	0.065	0.064	0.067	0.077	0.059	16
2	食品制造业	0.026	0.029	0.032	0.037	0.04	0.045	0.047	0.057	0.039	17
3	酒、饮料和精制茶制造业	0.018	0.021	0.019	0.021	0.023	0.024	0.025	0.025	0.022	22
4	烟草制品业	0.01	0.009	0.01	0.011	0.011	0.01	0.01	0.008	0.01	28
5	纺织业	0.052	0.056	0.061	0.066	0.07	0.074	0.087	0.095	0.07	15
6	纺织服装、服饰业	0.024	0.025	0.026	0.029	0.03	0.031	0.034	0.036	0.029	20
7	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	0.009	0.01	0.013	0.015	0.016	0.018	0.025	0.028	0.017	24
8	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	0.006	0.007	0.009	0.011	0.013	0.014	0.017	0.018	0.012	27
9	家具制造业	0.006	0.008	0.009	0.014	0.018	0.022	0.028	0.033	0.017	25
10	造纸和纸制品业	0.018	0.021	0.022	0.027	0.031	0.038	0.04	0.045	0.03	19
11	印刷和记录媒介复制业	0.008	0.01	0.011	0.013	0.017	0.021	0.026	0.032	0.017	26
12	文教、美工、体育和娱乐用品制造业	0.017	0.021	0.023	0.028	0.033	0.037	0.043	0.046	0.031	18
13	石油、煤炭及其他燃料加工业	0.02	0.023	0.021	0.022	0.025	0.028	0.031	0.036	0.026	21
14	化学原料和化学制品制造业	0.183	0.202	0.205	0.222	0.237	0.242	0.248	0.269	0.226	5
15	医药制造业	0.129	0.137	0.131	0.142	0.151	0.159	0.169	0.202	0.153	7
16	化学纤维制造业	0.016	0.016	0.018	0.019	0.022	0.024	0.029	0.029	0.022	23
17	橡胶和塑料制品业	0.061	0.067	0.068	0.082	0.097	0.107	0.129	0.156	0.096	12
18	非金属矿物制品业	0.064	0.071	0.073	0.084	0.102	0.121	0.149	0.178	0.105	11
19	黑色金属冶炼和压延加工业	0.115	0.119	0.102	0.102	0.119	0.118	0.139	0.148	0.12	8
20	有色金属冶炼和压延加工业	0.066	0.073	0.075	0.084	0.093	0.096	0.104	0.11	0.088	13
21	金属制品业	0.07	0.078	0.083	0.097	0.11	0.132	0.161	0.192	0.115	9
22	通用设备制造业	0.182	0.202	0.2	0.22	0.234	0.26	0.305	0.352	0.244	4
23	专用设备制造业	0.176	0.183	0.173	0.19	0.217	0.242	0.278	0.331	0.224	6
24	汽车制造业	0.192	0.222	0.232	0.278	0.311	0.323	0.339	0.363	0.283	3

续表 3.2 2013—2020 年中国制造业各行业技术创新综合指数表

序号	行业	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	平均 值	排 名
25	铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	0.092	0.104	0.105	0.108	0.108	0.103	0.118	0.136	0.109	10
26	电气机械和器材制造业	0.275	0.31	0.306	0.356	0.405	0.431	0.466	0.524	0.384	2
27	计算机、通信和其他电子设备制造业	0.415	0.45	0.467	0.527	0.603	0.689	0.768	0.867	0.598	1
28	仪器仪表制造业	0.059	0.067	0.062	0.067	0.075	0.077	0.091	0.11	0.076	14
29	其他制造业	0.004	0.004	0.007	0.007	0.008	0.01	0.012	0.015	0.008	29
30	金属制品、机械和设备修理业	0	0.001	0.001	0.003	0.002	0.002	0.003	0.004	0.002	30

3.2 制造业碳排放指标测算

3.2.1 碳排放的测算方法

碳排放是一个集合概念，它是指在一定区域和时间内经济主体所产生的以二氧化碳为主的温室气体的总称。由于其他气体所占比重比较小，且不好统计，所以在这里只计算二氧化碳的排放量。但目前并没有一个统一的方法来计算二氧化碳的排放量，大部分学者采用 IPCC 清单法来进行测算，杨世兵（2021）用该方法计算了县域内二氧化碳的排放量，赵凡和罗良文（2022）用该种办法测算了长江经济带中的所有城市的碳排放量，赵玉焕等（2022）也是用此种方法测算了东部、中部以及西部的二氧化碳排放量。Kaplan（2011）、Zhang（2009）、Meng（2013）等人也用此种方法计算了中国区域内的二氧化碳排放量。

3.2.2 碳排放的指标选择

由于各种统计年鉴并未直接给出各个制造业行业的二氧化碳排放量，故本文依据碳排放系数法进行测算各行业二氧化碳的排放量。需先搜集制造业各细分行业所消耗的 8 种能源（煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气）的量再依据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》所给出的碳排放系数，计算出二氧化碳排放量，用制造业各细分行业的主营业务收入与二氧化碳排放量的比值作为碳排放的指标——碳排放效率。

表 3.3 二氧化碳系数表

能源 单位		原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
SCC	折标准煤 系数（吨标 准煤/吨& 万立方米）	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.4571	1.4286	1.3330
TF	平均低位 发热量（千 焦/千克）	20908	28435	41816	43070	43070	42652	41816	38931
CC	单位热值 含碳量（吨 碳/TJ）	26.4	29.5	20.1	18.9	19.5	20.2	21.1	15.3
CR	碳氧化率	0.98	0.93	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99
44/12	——	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67
CCO	二氧化碳 系数（吨/ 标准煤&万 平方米）	19812	28604	30202	29251	30179	30959	31705	21622

资料来源：《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》

注： $CCO_i = TF_i \times CC_i \times CR_i \times 44/12$

具体测算方法如下：

$$CO_2 = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n EC_i \times CCO_i = \sum_{i=1}^n EC_i \times (TF_i \times CC_i \times CR_i \times 44/12)$$

其中，用 CO_2 代表 8 种能源所产生的碳排放量，在本文也就是制造业二氧化碳的排放量用 C_i 表示一种能源的碳排放量， EC_i 表示折算为标准煤之后的能源消费量， CCO_i 代表二氧化碳系数，化石燃料的平均低位发热量用 TF_i 表示，单位热值的含碳量用 CC_i 表示， CR_i 碳氧化率表示燃料燃烧过程中的碳氧化率， $44/12$ 表示碳原子质量和二氧化碳分子质

量间的转化系数。

3.2.3 碳排放指标测算结果的对比分析

在利用碳排放系数法估算出 2013—2020 年我国 30 个制造业行业 8 年的二氧化碳排放量，如表 3.4 所示，再对各行业的数据进行具体分析。

(1) 制造业碳排放变化趋势

如表 3.4 所示。在 2013—2020 年的制造业 30 个细分行业中，有 25 个行业的碳排放量是减少的，有 5 个行业的碳排放量是增加的，这 5 个行业为资本密集型行业，分别是：石油、煤炭及其他燃料加工业、化学原料和化学制品制造业、化学纤维制造业、有色金属冶炼和压延加工业、金属制品业。在碳排放量增速的方面，增幅排行前三的行业也是资本密集型行业，分别为：金属制品业、有色金属冶炼和压延加工业、石油、煤炭及其他燃料加工业。年均增长率分别为 13.49%、9.81%、4.39%。增幅排行靠后的三个行业分别为：烟草制品业、家具制造业、其他制造业。年均增长率分别为：-27.47%、-27.15%、-26.17%。

(2) 细分行业碳排放对比分析

从表 3.4 中可以看出年均碳排放量前三的行业分别为：石油、煤炭及其他燃料加工业、黑色金属冶炼和压延加工业、化学原料和化学制品制造业。年均排放量分别为：268883 万吨、173234 万吨、74861 万吨。年均碳排放量靠后的三个行业分别为：金属制品业、机械和设备修理业、仪器仪表制造业、烟草制品业，年均碳排放量分别为：29 万吨、64 万吨、68 万吨。可以看出一些资本密集型行业的碳排放量远远高于技术密集型行业和劳动密集型行业。

表 3.4 2013—2020 年制造业二氧化碳排放量表（单位：万吨）

序号	行业	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	平均值	排名
1	农副食品加工业	6664	5792	5807	5729	5029	4259	3926	3291	5062	8
2	食品制造业	4025	3720	3324	3444	3139	3303	3353	3378	3461	9
3	酒、饮料和精制茶制造业	3222	2701	2420	2238	1968	1433	1287	1044	2039	13
4	烟草制品业	142	117	98	64	52	38	21	14	68	28
5	纺织业	5875	5005	9498	8480	6747	2030	1717	1325	5085	7
6	纺织服装、服饰业	736	715	678	593	499	330	169	131	481	22
7	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	151	346	407	357	339	290	212	80	273	24

续表 3.4 2013—2020 年制造业二氧化碳排放量表（单位：万吨）

序号	行业	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	平均值	排名
8	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	1258	1063	966	699	504	297	260	157	651	20
9	家具制造业	189	167	161	122	70	38	27	18	99	27
10	造纸和纸制品业	10648	9702	9385	9260	9233	8595	7940	7214	8997	6
11	印刷和记录媒介复制业	183	211	206	211	136	167	159	148	178	26
12	文教、美工、体育和娱乐用品制造业	289	329	312	291	218	121	80	68	214	25
13	石油、煤炭及其他燃料加工业	233246	242353	253313	255996	263657	283112	304875	314511	268883	1
14	化学原料和化学制品制造业	72641	77648	84441	81194	73149	68055	68182	73579	74861	3
15	医药制造业	2829	2845	3081	2911	2431	1894	1636	1542	2396	11
16	化学纤维制造业	2256	2147	2185	2795	2717	2723	2707	2317	2481	10
17	橡胶和塑料制品业	2476	2234	2125	1896	1491	1131	908	654	1614	15
18	非金属矿物制品业	67498	70196	67224	65061	57450	52646	50334	54567	60622	4
19	黑色金属冶炼和压延加工业	181266	185603	174303	172067	167980	164745	168183	171726	173234	2
20	有色金属冶炼和压延加工业	20683	30828	31271	32896	35025	44834	42583	35580	34213	5
21	金属制品业	1922	1535	1414	1192	883	2209	2239	2520	1739	14
22	通用设备制造业	3067	2933	2791	2659	1842	1309	907	1341	2106	12
23	专用设备制造业	1204	1155	1008	827	620	283	212	138	681	19
24	汽车制造业	1946	1671	1488	1337	1008	672	448	357	1116	16
25	铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	777	434	370	313	454	478	181	157	396	23
26	电气机械和器材制造业	1655	1528	1655	1292	368	206	161	130	874	17
27	计算机、通信和其他电子设备制造业	465	437	445	410	362	506	939	432	500	21
28	仪器仪表制造业	130	102	83	74	55	28	21	16	64	29
29	其他制造业	1704	1874	1380	987	750	23	19	19	845	18
30	金属制品、机械和设备修理业	48	29	30	27	38	21	20	22	29	30

资料来源：《中国能源统计年鉴》《中国统计年鉴》。

4 制造业技术创新对碳排放的产业关联溢出效应实证检验

4.2 空间计量模型的设定

4.1 计量模型的设定与数据来源

4.1.1 变量选取

(1) 被解释变量

被解释变量为碳排放效率。一个行业能否将其他行业的新技术吸收并应用到自己的产品上以促进行业往低碳方向发展，取决于企业的单位碳排放能否获得更大的效益，所以本文将用制造业各行业的主营业务收入与碳排放量的比值，即制造业各行业每单位二氧化碳排放量带来的经济效益来表示碳排放效率指标。

(2) 解释变量

解释变量为技术创新。根据第三章所选取的指标利用熵值法计算出制造业每个细分行业的技术创新指标。

(3) 控制变量

本文参考韩先锋等（2023）吴卫红等（2023）众多学者的研究的成果，引入了科研水平、资本深化、行业规模、盈利能力、市场竞争程度、工资水平 6 个控制变量，全面考察技术创新如何影响制造业的碳排放。

①科研水平，用规模以上制造业企业 R&D 内部经费支出表示。

②资本深化，用规模以上制造业企业固定资产投资表示。

③行业规模，用规模以上制造业企业主营业务收入表示。

④盈利能力，用规模以上制造业企业年利润总额表示。

⑤市场竞争程度，用规模以上制造业企业数表示。

⑥工资水平，用各制造行业城镇非私营单位就业人员平均工资表示。

4.1.2 数据来源及变量的描述性统计

本文根据统计年鉴的行业划分依据，在 31 个制造业行业中选取 30 个行业，30 个行业中不包含废弃资源综合利用业，因为废弃资源综合利用业的多种数据缺失较多。在选择某一时间段的数据时，考虑到 2013 年前后部分数据在统计时行业名称发生了改变，以及《中国工业统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》等年鉴目前的数据只统计到了 2020 年，故选取制造业 30 个行业 2013-2020 年的数据。数据主要来源于《中国统计年鉴》、《中国高技术统计年鉴》、国家统计局、《中国科技统计年鉴》、《中国工业统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国劳动统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》，对于缺失数据采取插值法进行填充，本文对除解释变量之外的所有相关数据采取了对数化处理以消除异方差影响，得到了相关变量的描述性统计结果，如表 4.1 所示。

表 4.1 变量的描述性统计

变量	符号	均值	标准差	最小值	最大值
碳排放效率	y	2.675	1.976	-2.033	6.650
技术创新指数	x	0.108	0.136	0.000	0.867
科研水平	a1	14.446	1.264	11.263	17.188
资本深化	a2	8.472	1.050	5.807	10.335
行业规模	a3	9.942	1.050	6.736	11.625
盈利能力	a4	7.174	1.077	2.655	8.838
市场竞争程度	a5	8.914	1.231	4.654	10.588
工资水平	a6	11.030	0.308	10.443	12.250

4.2.1 空间权重矩阵设定

本文参考朱芳平（2016）和钞小静（2022）的做法，利用 2018 年的投入产出表计算出 30 个制造业行业的列昂惕夫逆矩阵 W ，矩阵 W 中的列元素代表其他 29 个行业对该行业的投入，行元素代表该行业对其他 29 个行业提供的中间商品的量，列元素的和代表该行业生产的商品所消耗的全部中间商品的数量。前向空间权重矩阵 W_1 的计算过程如下：

$$W_1 = \begin{bmatrix} 1 + X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & \cdots & 1 + X_{nn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 + X_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 + X_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

上式中等号右侧的矩阵为昂惕夫逆矩阵 W ，用它减去各行业自身的消耗，让主对角线上的数字全为 0 之后就得到了前向空间权重矩阵 W_1 ，将 W_1 转置后得到的 W_2 ，即为后向空间权重矩阵。

4.2.2 全局空间自相关检验

在做空间计量模型之前一般要进行空间自相关检验，主要目的是看变量是否存在空间自相关关系，这里的自相关检验又包括两种，一种是全局自相关检验，另外一种为局部自相关检验。两种检验都选取莫兰指数统计量，全局空间自相关莫兰指数统计量计算公式为：

$$\text{Moran's I} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}$$

其中， $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$ ， $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$

表达式中的 W_{ij} 为前后向空间权重矩阵， Y_i 、 \bar{Y} 分别表示变量的观测值和平均值。莫兰指数的取值在 -1 到 1 之间。当莫兰指数为正值时，为空间正相关，当为负值时，为空间负相关，当莫兰指数为 0 时表示变量不相关。

4.2.3 局部空间自相关检验

如果全局莫兰指数显著认为在该行业存在空间自相关，但不知道具体什么地方存在空间自相关时，这时候需要局部莫兰指数来辨别，局部自相关莫兰指数统计量计算公式为：

$$\text{Moran's I} = \frac{n(Y_i - \bar{Y}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

局部莫兰指数的值也是莫兰指数散点图回归线的斜率，表达式中的 W_{ij} 为空间权重矩阵， Y_i 、 \bar{Y} 分别表示变量的观测值和平均值。

4.2.4 空间计量模型

常见的空间计量模型有三种，空间误差模型（SEM）、空间自回归模型（SAR）、空间杜宾模型（SDM），空间杜宾模型综合了前两个模型的优点，在建模过程中能够解决变量遗漏的问题，以便更好地估计空间效应。（郭国强，2013）

三类空间计量模型的具体形式分别为：

SAR 模型：

$$Y = \rho WY + X\beta + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \delta^2 I_n)$$

SEM 模型：

$$Y = X\beta + \mu$$

$$\mu = \theta W_\mu + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \delta^2 I_n)$$

SDM 模型：

$$Y = \rho WY + X\beta + \Psi WX + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \delta^2 I_n)$$

在三个模型中的 ρ 、 W 、 β 、 ε 、 X 、 Y 分别表示空间自回归系数、空间权重矩阵、回归系数、随机误差项、自变量、因变量。在本文自变量是技术创新，因变量是碳排放效率。在 SAR 模型和 SDM 模型中的 WY 是被解释变量的空间滞后项，在 SDM 模型中的 WX 是解释变量和控制变量的空间滞后项。

4.2.5 实证结果分析

（1）全局自相关分析

利用 stata 得到全局 Moran's I（莫兰指数）的测算结果，如表 4.2 所示，从表可以看出，2013 年至 2020 年我国制造业技术创新与碳排放效率的莫兰指数都为正值，并且在 5% 的置信水平上显著，所以，制造业各行业的技术创新与碳排放之间存在着显著的正向关联。

表 4.2 2013-2020 制造业技术创新指数及碳排放效率的莫兰指数

年份	前向空间权重矩阵		后向空间权重矩阵	
	技术创新水平	碳排放效率	技术创新水平	碳排放效率
2013 年	0.148 ^{***} (0.003)	0.113 ^{**} (0.026)	0.231 ^{***} (0.000)	0.144 ^{***} (0.007)
2014 年	0.148 ^{***} (0.003)	0.105 ^{**} (0.035)	0.231 ^{***} (0.000)	0.123 ^{**} (0.017)
2015 年	0.135 ^{***} (0.005)	0.102 ^{**} (0.040)	0.214 ^{***} (0.000)	0.134 ^{**} (0.010)
2016 年	0.134 ^{***} (0.005)	0.112 ^{**} (0.026)	0.216 ^{***} (0.000)	0.139 ^{***} (0.008)
2017 年	0.137 ^{***} (0.004)	0.101 ^{**} (0.040)	0.221 ^{***} (0.000)	0.147 ^{***} (0.006)
2018 年	0.136 ^{***} (0.004)	0.100 ^{**} (0.042)	0.224 ^{***} (0.000)	0.146 ^{***} (0.006)
2019 年	0.146 ^{***} (0.002)	0.103 ^{**} (0.038)	0.237 ^{***} (0.000)	0.139 ^{**} (0.009)
2020 年	0.154 ^{***} (0.001)	0.115 ^{**} (0.024)	0.248 ^{***} (0.000)	0.154 ^{***} (0.004)

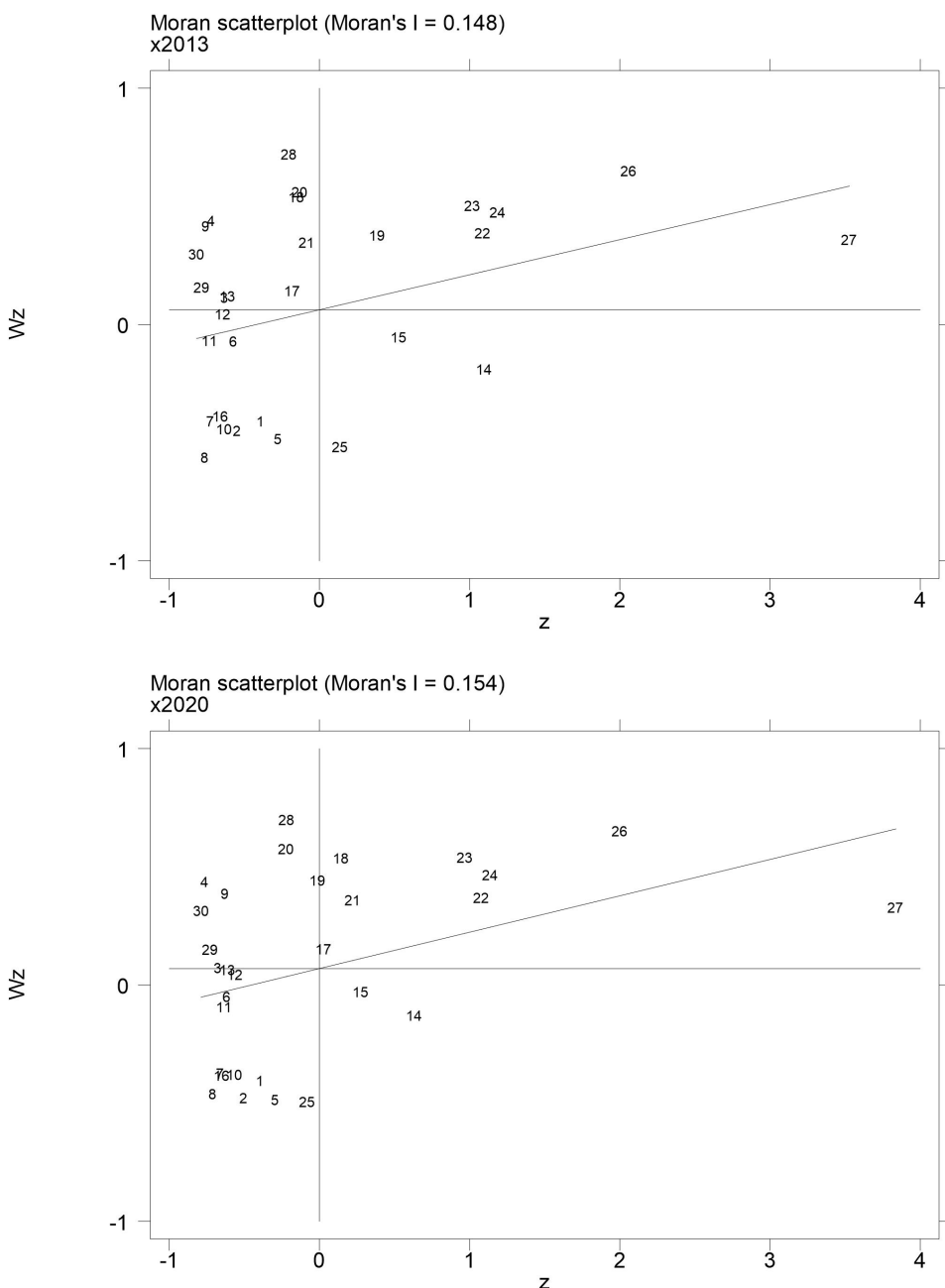
注：***表示在 1%的水平上显著、**表示在 5%的水平上显著、*表示在 10%的水平上显著。

下同。该表括号内为 z 值。（2）局部自相关分析

对制造业的技术创新再进行局部空间相关性检验，由于年份较多，只针对开始年份 2013 年和结束年份 2020 年在前向空间权重矩阵下绘制莫兰散点图，并对每个行业在图中的具体位置做出分析如下图 4.1 和 4.2 所示：

莫兰散点图的横轴代表自身的技术创新水平，纵轴代表上下游行业的技术创新水平，横轴的右半部分及纵轴的上半部分代表技术创新水平高，横轴的左半部分及纵轴的下半部分代表技术创新水平低。如图 4.1，据 2013 年的莫兰散点图可知，第一象限中的 22 通用设备制造业、26 电气机械和器材制造业、27 计算机、通信和其他电子设备制造业等 6 个行业其自身的技术创新水平较高，上下游行业的技术创新水平也较高，处于高一高集聚区。在第三象限中的行业 1 农副食品加工业、2 食品制造业、5 纺织业等 10 个行

业自身技术创新水平较低，其上下游行业的技术创新水平相对较低，处于低—低集聚区。位于二、四象限的行业由于自身技术创新水平较低或上下游行业技术创新水平较低，不能对其他行业产生产业关联溢出效应，故不属于本文的典型观测行业，这种非典型的行业由 2013 年的 14 个降到 2020 年的 8 个，说明制造业技术创新的空间相关性随着时间的推移越来越明显。具有较高技术创新水平的行业被技术创新水平较高的行业所环绕，技术创新水平较低的行业被技术创新水平较低的行业所环绕，技术创新水平较高的行业与技术创新水平较低的行业发生聚集的情况越来越少。



注：图中序号和表 3.2 中的序号所对应的行业相同（下同）

图 4.1 2013 年（上）和 2020 年（下）前向空间权重矩阵下制造业技术创新水平莫兰散点图

由图 4.2 可以看出, 2013 年和 2020 年的碳排放效率的聚集情况大体与技术创新指标的一致, 大部分观测值集中于一、三象限, 也就是高一高集聚区和低一低集聚区。2013 年时, 有 12 个行业位于第一象限的高一高集聚区, 说明 26 电气机械和器材制造业、27 计算机、通信和其他电子设备制造业、28 仪器仪表制造业等 12 个行业的碳排放效率较高, 上下游行业的碳排放效率也较高。9 个行业位于第三象限的低一低集聚区, 说明 1 农副食品加工业、2 食品制造业、3 酒、饮料和精制茶制造业等 9 个行业的碳排放效率较低, 上下游行业的碳排放效率也较低。位于第二、四象限的行业数越多, 则空间相关性越弱, 在二、四象限的行业总个数为 9, 2020 年增加至 10 个, 尽管碳排放效率在近几年的聚集程度有变动, 但整体来说变动比较平稳。具有较高碳排放效率的行业被具有高碳排放效率的行业所环绕, 碳排放效率较低的行业被碳排放效率较低的行业所环绕, 碳排放效率较高的行业与碳排放效率较低的行业发生聚集的情况相对较少且变化情况较为平稳。

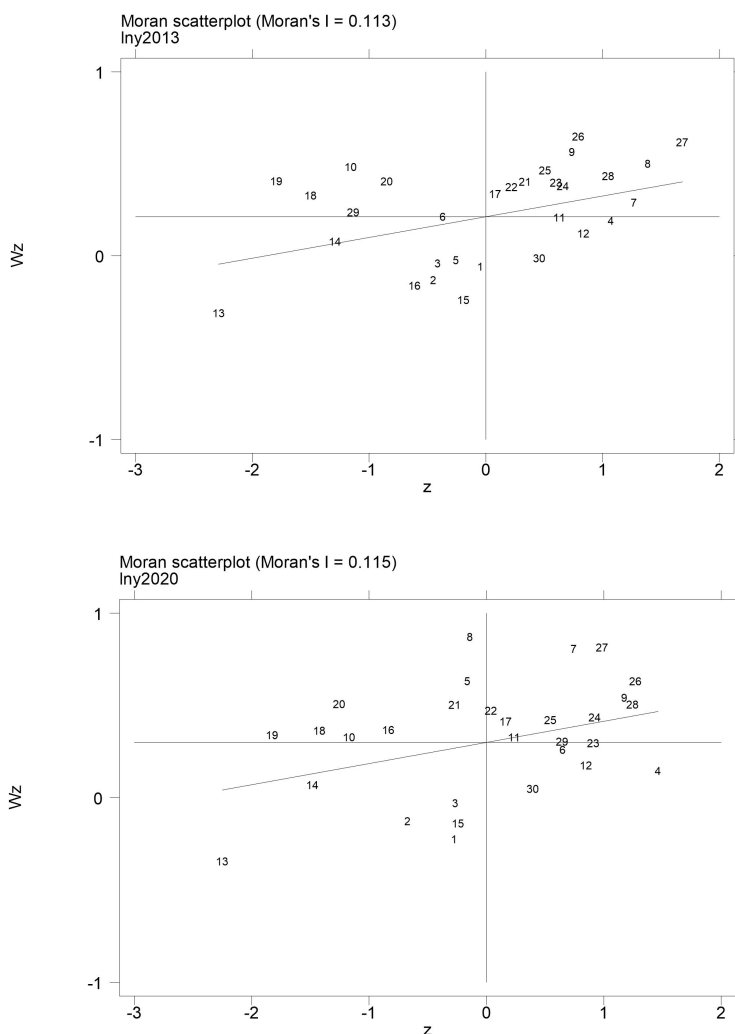


图 4.2 2013 年 (上) 和 2020 年 (下) 前向空间权重矩阵下制造业碳排放效率莫兰散点图

(3) 空间计量模型选择及检验

①LM 检验

在进行实证检验之前，我们需要做一些检验看此文章适合三种空间计量模型下的哪一种，首先是 LM 检验，据表 4.3 中的 P 值可知，在两种空间权重矩阵下的空间误差模型稳健的拉格朗日乘数，空间滞后模型的拉格朗日乘数和稳健的拉格朗日乘数检验均在不同的置信水平下显著，所以本文使用综合了误差效应和滞后效应的空间杜宾模型。

表 4.3 LM 检验表

检验方法		前向空间权重矩阵		后向空间权重矩阵	
		统计量	P 值	统计量	P 值
SEM	LM	2.147	0.143	2.201	0.138
	Robust-LM	4.402	0.036	4.771	0.029
SAR	LM	10.468	0.001	8.283	0.004
	Roubust-LM	12.722	0.000	10.854	0.001

②Hausman 检验

Hausman 检验确定所选用的空间杜宾模型是采用固定效应还是随机效应，在表 4.4 中可以看到两种空间权重矩阵下的统计量分别为 34.83、51.02，并且都在 1%的置信水平下显著，这时应拒绝解释变量与误差项无关，模型设定为随机效应的原假设，所以本文选择固定效应，并且本文选择双固定模型效果最佳。

表 4.4 Hausman 检验

检验	前向空间权重矩阵		后向空间权重矩阵	
	系数	P 值	系数	P 值
Hausman 检验	34.83	0.0026	51.02	0.0000

③LR 检验与 wald 检验

通过 LR 检验与 wald 检验看 SDM 模型是否会退化为 SAR 或 SEM 模型，LR 检验和 Word 检验结果均通过了 1%显著性检验，认为 SDM 模型不会退化为 SAR 或 SEM 模型。故本文选择双固定效应模型下的空间杜宾模型。

表 4.5 LR 与 Wald 检验表

检验	前向空间权重矩阵		后向空间权重矩阵	
	系数	P 值	系数	P 值
LR 检验 (SDR or SAR)	40.77	0.0000	58.25	0.0000
LR 检验 (SDR or SEM)	42.39	0.0000	56.33	0.0000
Wald 检验 (SDR or SAR)	33.62	0.0000	24.51	0.0009
Wald 检验 (SDR or SAR)	25.60	0.0006	23.66	0.0013

4.3 技术创新对碳排放的产业关联溢出效应实证分析

4.3.1 模型结果分析

(1) 从实证结果来看, 技术创新指数对碳排放效率的影响显著为负。在前向空间权重矩阵和其他变量不变的情况下, 技术创新指数每提高 1%, 碳排放效率下降 3.843%, 在后向空间权重矩阵和其他变量不变的情况下, 技术创新指数每提高 1%, 碳排放效率降低 3.131%。由于碳排放效率=主营业务收入/碳排放总量, 当碳排放效率降低时, 说明技术创新使得制造业各行业主营业务的收入增速远不及碳排放总量的增速大, 以石油、煤炭及其他燃料加工业为例, 2013 年、2020 年的主营业务收入分别为 39399.01 亿元、48583.4 亿元, 主营业务收入增速为 23.31%, 2013 年、2020 年的二氧化碳排放量分别为 233246 万吨、314511 万吨, 二氧化碳排放量的增速为 34.84%, 可见石油、煤炭及其他燃料加工业的碳排放总量的增速大于主营业务的收入增速, 虽然一些技术密集型企业的碳排放总量增速小于主营业务收入增速, 但由于制造业中大多数行业属于资本密集型行业和劳动密集型行业, 所以使得制造业整体主营业务收入增速远不及碳排放总量的增速大。

碳排放总量增速大的原因之一: 技术创新发生后, 导致该行业单位产品的能耗降低, 产品的成本也随之降低, 因此该产品的价格就会随之降低, 进而会导致消费者对该产品的市场需求量上升, 因此企业就会扩大生产规模, 产品的生产总量上升, 从而导致能源消耗总量上升, 因为规模扩张导致的能源消耗超过了因为效率提升导致的能耗下降的部分, 进而使得碳排放量总量会增加。原因之二: 技术创新多存在于大型企业, 我国中小企业很难实现自主技术创新, 因为中小企业技术设备落后、高层次人才短缺、科研创新资金不足, 这使得中小企业只能通过向大型企业购买技术才能实现技术上的创新, 但在新技术产生的短期内购买价格极高, 这迫使中小企业不得不沿袭原来的生产发展路径,

很难在技术上取得突破。即使中小企业获得了新技术，但由于这些企业缺乏发展高端产业链的条件，生产效率较低的产品会浪费掉有限的资源，造成扭曲的生产要素的配置，从而增加二氧化碳的排放。

(2) 虽然技术创新在整体上促进了制造业的碳排放，但两个空间权重矩阵下技术创新的空间效应交互项系数分别为 13.438、17.779，均为正值且都在 1% 的置信水平下显著，表明一个行业技术上的创新对其上下游行业的碳排放效率具有正向影响，也就是一个行业的技术创新能够降低其上游行业的碳排放量，也能降低其下游行业的碳排放量。这是因为技术创新能够突破行业间的约束，上游行业在使用新技术、新工艺时碳排放量减少，下游行业在使用中间产品时也能够降低该行业的碳排放。例如通用设备制造业为了减少对环境的污染，需要采用环保的制造工艺和材料，而上游行业可吸收通用设备制造业的新工艺新材料来创新上游行业的产品，从而节省能源的消耗，减少上游行业的碳排放。通用设备制造业新研发的产品作为中间产品也可直接用于下游行业的生产环节，比如一些智能化设备，这些设备可促使下游行业在改善资源配置效率的基础上降低交易成本促进下游行业的绿色发展，从而减少下游行业的碳排放。

由于空间杜宾模型中各影响因素的估计值并不能反映真实的边际效应。因此在下节中要进行效应分解，效应分解一般分解为直接效应、间接效应、总效应，而本文探索的是产业关联溢出效应，主要看一个行业的技术创新对其上下游碳排放的影响，故在产业关联溢出效应分析中仅对间接效应作出解释。

表 4.6 空间计量模型估计结果

变量	前向空间权重矩阵			后向空间权重矩阵		
	SAR	SEM	SDM	SAR	SEM	SDM
x	-0.717 (-0.59)	0.314 (0.25)	-3.843*** (-2.81)	-0.497 (-0.39)	1.033 (0.96)	-3.131** (-2.46)
lna1	0.680** (2.25)	0.386 (1.31)	0.564* (1.94)	0.674** (2.16)	0.459 (1.57)	0.653** (2.19)
lna2	0.849* (1.82)	0.888* (1.85)	0.772* (1.74)	0.929* (1.94)	1.050** (2.20)	0.745* (1.68)
lna3	-0.677 (-1.35)	-0.817 (-1.57)	-1.300*** (-2.68)	-0.733 (-1.42)	-0.656 (-1.28)	-0.687 (-1.44)
lna4	-0.249* (-1.89)	-0.289** (-2.11)	-0.359*** (-2.87)	-0.254* (-1.87)	-0.272** (-2.02)	-0.324*** (-2.64)
lna5	0.063 (0.13)	0.225 (0.44)	0.433 (0.85)	0.071 (0.14)	-0.028 (-0.05)	-0.288 (-0.59)

续表 4.6 空间计量模型估计结果

变量	前向空间权重矩阵			后向空间权重矩阵		
	SAR	SEM	SDM	SAR	SEM	SDM
Lna6	-3.440*** (-3.00)	-2.789** (-2.55)	-3.208*** (-2.87)	-3.379*** (-2.86)	-3.567*** (-3.17)	-3.682*** (-3.43)
W*x			13.438*** (3.36)			17.779*** (5.02)
W*lna1			2.841*** (3.64)			3.041*** (2.75)
W*lna2			-0.651 (-0.41)			0.057 (0.03)
W*lna3			-0.551 (-0.34)			1.152 (0.47)
W*lna4			-1.320*** (-2.82)			-1.292 (-1.57)
W*lna5			3.289 (1.54)			-1.316 (-0.59)
W*lna6			2.921 (1.05)			-5.695 (-1.26)
ρ	-0.582*** (-3.13)		-0.421** (-2.05)	-0.560*** (-3.04)		-0.401** (-2.06)
sigma2_e	0.249*** (11.44)	0.264*** (10.90)	0.215*** (11.25)	0.265*** (10.76)	0.258*** (10.85)	0.207*** (10.93)
Log-L	-181.6101	-182.4220	-161.2275	-181.9361	-180.9737	-152.8110
Obs	240	240	240	240	240	240
R ²	0.090	0.117	0.021	0.111	0.148	0.094

注：***表示在 1%的水平上显著、**表示在 5%的水平上显著、*表示在 10%的水平上显著。下同。

该表括号内为 z 值。

4.3.2 产业关联溢出效应分析

在 SDM 模型中不能用各影响因素的估计值衡量实际的边际效应，因为模型中含有解释变量和被解释变量的空间滞后项，这时要采取偏微分方程计算间接效应。若空间杜宾模型为：

$$Y = \rho WY + X\beta + \Psi WX + I_n\alpha + \varepsilon$$

X、Y 分别为自变量和因变量，W 为前、后向空间权重矩阵， I_n 为 n 阶单位矩阵，n 为观测值个数， ρ 、 β 、 Ψ 、 α 为估计参数， ε 为随机误差项。

将上式变形为：

$$Y = \sum_{r=1}^k S_r(W)X_r + V(W)I_n\alpha + V(W)\varepsilon$$

上式中， $S_r(W) = V(W)(I_n\beta_r + W\Psi_r)$ ， $V(W) = (I_n - \rho W)^{-1} = I_n + \rho W + \rho^2 W^2 + \rho^3 W^3 + \dots$ ，自变量个数用 K 表示。

则有：

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \sum_{r=1}^k \begin{bmatrix} S_r(W)_{11} & S_r(W)_{12} & \cdots & S_r(W)_{1n} \\ S_r(W)_{21} & S_r(W)_{22} & \cdots & S_r(W)_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_r(W)_{n1} & S_r(W)_{n2} & \cdots & S_r(W)_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1r} \\ X_{2r} \\ \vdots \\ X_{nr} \end{bmatrix} + V(W)I_n\alpha + V(W)\varepsilon$$

$$Y_i = \sum_{r=1}^k [S_r(W)_{i1}X_{1r} + S_r(W)_{i2}X_{2r} + \cdots + S_r(W)_{in}X_{nr}] + V(W)_i I_n\alpha + V(W)_i\varepsilon$$

对 X 求偏微分得到：

$$\frac{\partial Y_i}{\partial X_{jr}} = S_r(W)_{ij}$$

偏导系数 $S_r(W)_{ij} (j \neq i)$ 表示行业 j 的技术创新对行业 i 的碳排放效率的影响，也就是间接效应。用 `stata` 进行回归分析，结果如表 4.7 所示，制造业技术创新对碳排放的间接效应在两个空间权重矩阵下均通过了 1% 的显著性水平检验。间接效应系数在前向空间权重矩阵下为 10.588，说明本行业技术创新每提高 1%，下游行业碳排放效率可以增加 10.588%，也就意味着下游行业碳排放量的相对减少，技术创新对制造业下游行业的碳排放效率存在溢出效应。这是因为当下游行业所生产的产品用到本行业的机器设备时，若本行业的机器设备能在技术上有所创新，例如智能化设备、自动化设备，这必然会提高下游行业的生产效率，减少了因生产产品所耗能的时间，使得下游行业的碳排放量也减少。

间接效应系数在后向空间权重矩阵下为 13.804，说明本行业技术创新每提高 1%，上游行业碳排放效率可以增加 13.804%，也就意味着上游行业碳排放量的相对减少，技术创新对制造业上游行业的碳排放效率存在溢出效应。这是因为当一个行业产生有关生产上的技术创新时，能够提高对上游行业原材料的有效利用率，从而减少对上游行业原材料的使用量，上游行业就可以减少对原材料的加工量，从而减少因加工原材料所消耗的各种能源，进而减少上游行业的碳排放量。

再来看控制变量的空间效应系数，科研水平在两个空间权重矩阵下均通过了 1% 的显著性检验，其系数分别为 3.31、2.70，两个系数均为正值。说明一个行业的科研水平

对其上下游行业的碳排放效率具有正向影响，也就是一个行业的科研水平能够降低其上游行业的碳排放量也能降低其下游行业的碳排放量，对科研水平较高的行业而言更容易研发出新技术，例如电气机械和器材制造业所研发的太阳能发电，风能发电等技术，这些技术可以被上下游行业所利用改变传统的火力发电方式，从而节省能源的消耗，产生更少的二氧化碳。盈利能力在前向空间权重矩阵下通过了 1% 的显著性检验，其系数为 -1.320，系数为负值，说明一个行业的盈利能力对其下游行业的碳排放效率具有负向影响，也就是一个行业盈利能力强会使其下游行业的碳排放量增加。这是因为当一个行业的盈利能力强时，它必定向社会提供了大量的产品从而获得大量利润，而该行业所生产的大量产品作为中间商品又投入到了下游行业的生产中，使得下游行业产品的加工量大大增加，这必定会消耗大量的电能，而制造业主要采取火力发电，所以这就增加了化石燃料的燃烧，从而给下游行业带来更大的碳排放量。

表 4.7 空间杜宾模型的间接效应分解

效应分解	前向空间权重矩阵	后向空间权重矩阵
	间接效应	间接效应
x	10.588*** (3.81)	13.804*** (5.19)
lna1	2.307*** (3.31)	2.549*** (2.70)
lna2	-0.680 (-0.52)	0.038 (0.02)
lna3	-0.020 (-0.02)	1.035 (0.52)
lna4	-0.890** (-2.16)	-0.883 (-1.29)
lna5	2.359 (1.46)	-0.901 (-0.55)
lna6	3.382 (1.64)	-2.895 (-0.80)

4.4 稳健性分析

(1) 在表 4.8 中，只有空间杜宾模型的 Log-L 数据是最大的，说明本文使用空间杜宾模型较为稳健。

(2) 更换因变量为碳排放量，更换指标后发现，技术创新在前后向的空间权重矩阵下均通过了显著性水平检验。且系数均为负值，说明技术创新对上下游行业的碳排放

具有负向的溢出效应，也就是可以减少下游行业的碳排放，这与上文的结论是一致的。

表 4.8 稳健性检验结果

效应分解	前向空间权重矩阵	后向空间权重矩阵
	间接效应	间接效应
x	-3.259** (-2.04)	-3.113* (-1.88)
lna1	0.187 (0.55)	-0.354 (-0.63)
lna2	-0.680*** (3.40)	0.292 (0.25)
lna3	-0.020 (0.87)	0.013 (0.01)
lna4	-0.890*** (3.17)	0.288 (0.66)
lna5	2.359*** (-4.81)	-1.167 (-0.55)
lna6	3.382 (-1.47)	5.874** (0.015)

4.5 异质性分析

表 4.9 为技术创新水平不同的制造业行业的技术创新对其上下游行业碳排放溢出效应的分解，在不同的空间权重矩阵下，技术创新低水平行业的间接效应系数均未通过显著性水平检验，这是因为该行业的技术创新水平低，上下游行业无法从该行业吸收先进技术或先进产品应用到自己传统产业的改造提升、产业高级化的推进中，只能沿袭高排放、低附加值生产的路径，从而导致技术创新低水平行业的技术创新很难对上下游行业的碳排放带来溢出效应。

技术创新中水平行业的间接效应系数在前向空间权重矩阵下通过了 5% 的显著性检验，系数为正值，说明技术创新中水平行业的技术创新对其下游行业有正向的溢出效应，在后向空间权重矩阵下不显著，说明对其上游行业没有明显的溢出效应。这可能是因为技术创新中水平行业多为一些资源密集型行业，它们的上游行业为提供原材料的行业，一些不可再生的原材料的开采量更多的与这种资源的存量有关，和技术水平的关系不大，即使开采过程中使用到一些探测资源的仪器，这些仪器更多的是由技术创新高水平行业所创新的，因此技术创新中水平行业对其上游行业没有明显的溢出效应。

技术创新高水平行业的间接效应系数在两个不同的权重矩阵下均通过了 5% 或 1% 的

显著性水平检验，且系数为正值，说明在这两类行业中技术创新对他们上下游行业的碳排放存在正向空间溢出效应。这也与 4.3.2 产业关联溢出效应分析中所得到的结论是一致的。

表 4.9 创新程度不同的行业的溢出效应分解

行业	前向空间权重矩阵			后向空间权重矩阵		
	技术创新低	技术创新中	技术创新高	技术创新低水	技术创新中	技术创新高
	水平行业	水平行业	水平行业	平行业	水平行业	水平行业
X 间接效应	-105.434 (-1.20)	22.837** (2.13)	20.205*** (3.62)	11.680 (0.10)	13.772 (1.24)	13.886** (2.59)

5 制造业技术创新对碳排放的产业关联溢出效应大小及路径分析

5.1 技术创新对碳排放的溢出效应大小分析

5.1.1 模型构建

以上分析得出技术创新短期内会增加制造业的碳排放，但从细分行业来看一个制造业行业的技术创新会对上下游行业的碳排放效率产生正向的溢出效应，也就是会减少上下游行业的碳排放，那在 30 个行业中技术创新对上下游行业产生碳排放的溢出效应的大小该如何计算？以及 30 个制造业行业技术创新对上下游行业碳排放产生的溢出效应又是如何传递的？本章着重解决以上两个问题。将行业作为网络节点，基于溢出效应矩阵计算溢出效应的大小，运用 Ucinet 软件构建溢出有向网络，并结合相关指标刻画我国制造业技术创新对碳排放溢出网络的整体特征和个体特征，运用溢出效应网络图总结溢出路径。

本文借鉴 Erik（2002）产业间溢出效应的测算方法，结合制造业各细分行业 R&D 经费内部支出矩阵、二氧化碳排放量对角阵的逆矩阵、直接分配系数矩阵、完全感应系数矩阵，构造中国 2017 年、2018 年、2020 年技术创新对制造业下游行业碳排放的溢出效应矩阵（以下简称溢出效应矩阵），技术创新对制造业上游行业碳排放的吸收效应矩阵（以下简称吸收效应矩阵）。

溢出效应矩阵用来测算一个行业的技术创新对下游制造业行业的碳排放产生的溢出效应。溢出效应矩阵为：

$$D = \widehat{R}(I - B)^{-1}(\widehat{X})^{-1}$$

\widehat{R} 为 30 个制造业行业 R&D 经费内部支出列向量的对角阵， B 为直接分配系数构成的矩阵， $(I - B)^{-1}$ 为完全感应系数构成的矩阵， $(\widehat{X})^{-1}$ 为二氧化碳排放量构成的列向量的对角阵。 D 的第 i 行元素之和代表行业 i 的技术创新对下游制造业行业碳排放产生的溢出效应总和，即为技术创新对碳排放的溢出效应 MD_i ， $MD_i = DE^T$ ，其中 $E = (1, \dots, 1)$ 。最终溢出效应矩阵为：

$$D = \begin{bmatrix} r_{1,1} & \cdots & r_{1,30} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{30,1} & \cdots & r_{30,30} \end{bmatrix}$$

吸收效应矩阵用来测算一个行业从上游行业所吸收到的技术创新对其碳排放产生的溢出效应。吸收效应矩阵具体为：

$$C = \widehat{R}(\widehat{X})^{-1}(I - A)^{-1}$$

$(I - A)^{-1}$ 为完全需求系数矩阵。吸收效应矩阵 C 的第 i 列之和是 i 行业从制造业其他行业技术创新活动中吸收到的对其碳排放的溢出效应，即为技术创新对碳排放的吸收效应 MC_i ， $MC_i = EC$ 。最终技术创新溢出对碳排放的吸收效应矩阵为：

$$C = \begin{bmatrix} w_{1,1} & \cdots & w_{1,30} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{30,1} & \cdots & w_{30,30} \end{bmatrix}$$

5.1.2 结果分析

(1) 制造业技术创新对下游行业碳排放的溢出效应分析

表 5.1 计算了 2017 年、2018 年、2020 年各制造业细分行业的技术创新对其上下游行业碳排放的吸收效应及溢出效应。溢出效应较高的前三个行业为电气机械和器材制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业、仪器仪表制造业，同时这三个行业也属于技术密集型行业。可见技术密集型行业的技术创新能对下游行业的碳排放产生较大的溢出效应，技术密集型行业多属于本文章中的技术创新高水平行业，这与异质性分析的结果是一致的。

从溢出效应的平均值来看，计算机、通信和其他电子设备制造业的溢出效应是最高的，为 0.002878，表明该行业因技术创新每减少一单位二氧化碳的产出，向下游行业碳减排有 0.002878 的贡献度；石油、煤炭及其他燃料加工业的溢出效应最小，为 0.000023，表明该行业因技术创新每减少一单位二氧化碳的产出，向下游行业的碳减排有 0.000023 的贡献度。随着时间的推移，2020 年相对于 2017 年的技术创新对碳排放的溢出效应在 30 个行业中都是增加的，但铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业的技术创新对下游行业的碳排放的溢出效应呈现出了先减后增的趋势，2018 年这两个行业的技术创新对下游行业碳排放的溢出效应相较于 2017 年有所下降，分析其原因是铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业产生的新技术新产品在刚产生时其转让价格极高，一些下游小企业无力支付高昂的转让价格只能按照原来的生产路径进行生产，故这两个行业的技术创新无法在短期内对下游行业的碳减排起到促进作用，但随着时间的推移，新技术新产品的价格会有所下降，这会使一部分有能力的小企业引进新技术新产品从而减少二氧化碳

的排放量，也就是在 2020 年，这两个行业的溢出效应的增幅又出现递增趋势。

(2) 制造业技术创新对上游行业碳排放的吸收效应分析

从技术创新对碳排放的吸收效应的平均值来看，吸收效应排名前三的行业也是电气机械和器材制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业、仪器仪表制造业。可见技术密集型行业的技术创新也能对上游行业的碳排放产生较大的吸收效应。

仪器仪表制造业的技术创新对上游制造业行业的碳排放的吸收效应是最大的，为 0.00336，表明上游行业因技术创新减少一单位二氧化碳的产出时，对该行业碳减排有 0.00336 的贡献度；石油、煤炭及其他燃料加工业的吸收效应是最小的，为 0.000018，表明上游行业因技术创新减少一单位二氧化碳的产出时，对该行业的碳减排有 0.000018 的贡献度。随着时间的推移，2020 年相对于 2017 年来说，大部分行业中技术创新对上游行业碳排放的吸收效应的增幅呈现减少趋势，这与以上对溢出效应的分析是一致的，主要是因为一些新技术新产品在刚产生时其转让价格极高，一些小企业无力支付高昂的转让价格只能按照原来的生产路径进行生产，无法全部吸收上游行业的技术创新。

表 5.1 制造业技术创新对碳排放溢出效应及吸收效应测算表

序号	行业	2017年	2018年	2020年	平均溢出效应	排名	2017年	2018年	2020年	平均吸收效应	排名
1	农副食品加工业	31	44	56	44	27	27	31	31	30	28
2	食品制造业	16	30	23	23	29	44	46	40	43	24
3	酒、饮料和精制茶制造业	19	24	32	25	28	54	36	41	44	23
4	烟草制品业	188	205	286	226	13	369	202	286	286	10
5	纺织业	160	285	326	257	11	65	61	89	72	20
6	纺织服装、服饰业	78	132	123	111	22	191	166	170	176	16
7	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	98	211	364	224	14	233	234	384	284	11
8	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	87	134	266	162	16	119	89	194	134	19
9	家具制造业	177	330	567	358	9	435	384	665	495	9
10	造纸和纸制品业	80	105	150	112	20	53	28	40	40	26
11	印刷和记录媒介复制业	94	96	152	114	19	246	123	189	186	15
12	文教、美工、体育和娱乐用品制造业	105	133	142	127	17	0.000353	205	241	266	12
13	石油、煤炭及其他燃料加工业	17	22	31	23	30	20	10	25	18	30
14	化学原料和化学制品制造业	424	527	677	543	5	56	31	42	43	25
15	医药制造业	83	107	147	112	21	185	114	155	151	18
16	化学纤维制造业	67	101	131	100	23	64	34	50	49	22

续表 5.1 制造业技术创新对碳排放溢出效应及吸收效应测算表

序号	行业	2017年	2018年	2020年	平均溢出效应	排名	2017年	2018年	2020年	平均吸收效应	排名
17	橡胶和塑料制品业	248	332	555	378	8	212	128	231	190	14
18	非金属矿物制品业	51	69	117	79	25	76	36	50	54	21
19	黑色金属冶炼和压延加工业	103	114	162	126	18	51	24	35	37	27
20	有色金属冶炼和压延加工业	266	320	375	320	10	39	21	30	30	29
21	金属制品业	201	219	323	248	12	255	91	117	154	17
22	通用设备制造业	381	483	688	517	6	858	446	578	627	7
23	专用设备制造业	441	644	1014	700	4	1188	777	1173	1046	4
24	汽车制造业	369	484	656	503	7	977	599	825	800	5
25	铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	187	125	344	219	15	989	431	765	728	6
26	电气机械和器材制造业	1244	1597	2011	1617	3	2203	1353	1718	1758	3
27	计算机、通信和其他电子设备制造业	2631	2531	3471	2878	1	4279	1657	2155	2697	2
28	仪器仪表制造业	1262	2059	3545	2289	2	3537	2474	4068	3360	1
29	其他制造业	56	77	167	100	24	302	168	290	253	13
30	金属制品、机械和设备修理业	28	57	86	57	26	698	374	529	534	8

注：以上表格中的数值乘 10^{-6} 即为真实的制造业技术创新对碳排放溢出效应及吸收效应数值

5.2 制造业技术创新对碳排放的溢出路径分析

5.2.1 数据说明与方法介绍

利用社会网络分析法分析制造业技术创新对碳排放的溢出效应网络。在构建溢出效应网络时要依据溢出效应矩阵，以制造业产业为网络中的节点，若有溢出效应，则产业间构建一条有方向的边。若两个行业间的溢出效应大于阈值 k （溢出系数），则存在溢出效应，两个产业之间构建一条有方向的边；反之，则不构建。 k 值影响网络密度， k 太大产业间的连接稀疏，会漏掉一些重要的溢出路径， k 太小将导致连接过密。因此，本文选择多个溢出系数进行尝试，直到找到一个合适的 k 值。

（1）整体性分析

本文主要通过计算网络密度、群体中心性来刻画社会网络的整体结构特征。用网络密度来衡量制造业细分行业间技术相关性的大小，密度大就表示一个行业与其他行业的连接多，密度小就表示连接少。群体网络密度值越高，行业间互动程度越高，技术溢出会增加，溢出路径也会增多，反之，溢出路径就越少。用度表示一个行业与其他行业的关联程度，出、入度表示一个制造业行业的技术对下游、上游制造业行业碳排放的关联

程度。其关系式为：

$$C_D(n_i) = \sum_j x_{ij}$$

其中，若产业 i 和产业 j 之间存在溢出效应，则记 $x_{ij}=1$ ，否则 $x_{ij}=0$ 。

用群体中心性来描述技术创新溢出的行业依赖性。群体中心性用于计算网络中最高中心性行业和其他行业中心性之间的差异，差距越大，则整个行业程度中心性越高。表示产业技术创新溢出过分集中在某个行业。其关系式为：

$$H = \frac{\sum_{i=1}^g [C_D(n^*) - C_D(n_i)]}{\max \sum_{i=1}^g [C_D(n^*) - C_D(n_i)]}$$

其中， H 为群体中心性， $C_D(n^*)$ 是 $C(n)$ 中最大个体程度中心性。

(2) 个体性分析

本文主要通过计算点入度、点出度、行业角色来刻画社会网络的个体结构特征。如果关系的发出者为该行业，接受者为其他行业，则这两个行业之间的连线为一个点出度。点出度等于网络中由该行业指向其他行业的线条数，反映了该行业技术创新对下游行业碳排放的影响。而点入度则方向相反，点入度等于网络中由其他行业指向该行业的线条数，反映了上游行业技术创新对该制造业碳排放的影响。根据各产业出度、入度大小，将其在网络中的角色分为五类：①源：溢出效应大，出度很高，入度很低；②核心：溢出效应吸收效应都比较大，出度、入度均较高；③普通：溢出效应吸收效应都较小，出度、入度较低；④终端：吸收效应大，出度极小；⑤边缘：与其他产业鲜有溢出关联，出度、入度均很小。

5.2.2 结果分析

本文以溢出效应矩阵中的元素 r_{ij} 大小进行尝试，经过多次尝试得到当 $k=0.000001$ 时，网络密度合适，节点之间的联系不会过于紧密，也不会过于松散。当 $k>0.000001$ 元时，两产业之间存在溢出效应，两产业之间建立一条有方向的边，箭头由溢出产业指向吸收产业。也就是说，如果 j 行业每减少一单位二氧化碳的产生，通过直接或间接从 i 部门获取的研发费用表示的技术创新不低于 0.000001 元时，认为 i 部门的技术创新对 j 部门的碳排放产生了溢出效应，此时网络有一个合适的密度值 ($D_{2017}=0.2598$ ， $D_{2018}=0.2874$ ， $D_{2020}=0.3322$)。

(1) 整体性分析

随着年份的增加，制造业技术创新对碳排放的溢出网络的均值和网络指标密度值逐

渐上升 ($M_{2017}=7.533, M_{2018}=8.333, M_{2019}=9.733; D_{2017}=0.2598, D_{2018}=0.2874, D_{2020}=0.3322$)。表明 2020 年制造业上下游产业之间技术创新和碳排放的联系程度要高于 2017、2018 年。也就是说, 技术创新和碳排放的关联程度逐渐加强。2017、2018、2020 年的溢出网络的入度标准差都大于出度标准差 ($SD_{in2017}=6.448, SD_{out2017}=6.428, SD_{in2018}=6.472, SD_{out2018}=6.973; SD_{in2020}=6.444, SD_{out2020}=7.865$), 说明制造业技术创新对下游行业碳排放的溢出效应的差异性大于上游行业吸收效应的差异性。2017、2018、2020 年群体中心势观测值都不相等 ($H_{out2017}=0.373, H_{in2017}=0.409; H_{out2018}=0.416, H_{in2018}=0.452; H_{out2020}=0.402, H_{in2020}=0.509$), 反映出这三年一个行业的技术创新对下游行业碳排放的溢出效应与对上游行业的吸收效应在制造业各产业之间呈现较为不均衡的分布。

(2) 个体性分析

从出入度角度进行分析, 例如计算机、通信和其他电子设备制造业在 2018 年的出度为 17, 入度为 15, 也就是说该行业的技术创新能对 17 个下游行业的所利用进而减少 17 个下游行业的碳排放, 而该行业可以从 15 个上游行业吸收到技术创新, 从而降低自身的碳排放。

在 2017 年、2018 年、2020 年中都出现的核心行业 (核心行业能够将自身的技术创新溢出到其下游行业从而对下游行业的碳排放产生影响, 也能够从上游行业吸收到技术创新, 以降低自身行业的碳排放。) 有橡胶和塑料制品业、金属制品业、通用设备制造业、专用设备制造业、汽车制造业、电气机械和器材制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业、仪器仪表制造业这 7 个行业, 在这 7 个行业中除了橡胶和塑料制品业、金属制品业不属于技术密集型产业外, 其余均属于技术密集型产业。且 7 个行业全部属于本文中的技术创新中水平行业和技术创新低水平行业, 这也验证了第四章中技术创新中水平行业和技术创新高水平行业的技术创新能对其下游行业的碳排放产生间接的正向空间溢出效应。

而纺织业、化学原料和化学制品制造业、化学纤维制造业、黑色金属冶炼和压延加工业、有色金属冶炼和压延加工业 6 个行业在三年中属于源行业, 源行业的技术创新对下游行业碳排放的溢出效应较大且不从上游行业中吸收溢出效应。这是因为这六个行业多为资本密集型行业, 资本密集型行业通常涉及较多的资本投入, 技术装备多且投资大: 若想吸收上游行业的技术创新用在自身的生产线上, 需要对整个生产线进行更换设备或者改造设备, 需要较大的投资, 这使大部分企业望而却步, 因此这些行业很难吸收上游行业的技术创新对本行业碳排放产生溢出效应。2017 年至 2020 年, 除木材加工和木、

竹、藤、棕、草制品业和石油、煤炭及其他燃料加工业角色有变化外，其他产业在网络中的角色均未发生变动。

表 5.2 产业间技术创新溢出网络相关指标测算结果

序号	行业	2017 年			2018 年			2020 年		
		出度	入度	角色	出度	入度	角色	出度	入度	角色
1	农副食品加工业	3	0	边缘	4	1	边缘	4	0	边缘
2	食品制造业	0	1	边缘	2	1	边缘	2	1	边缘
3	酒、饮料和精制茶制造业	0	3	边缘	2	3	边缘	4	5	普通
4	烟草制品业	3	11	终端	3	11	终端	3	17	终端
5	纺织业	10	1	源	12	2	源	15	4	源
6	纺织服装、服饰业	4	9	普通	4	14	普通	6	12	普通
7	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	2	13	终端	2	18	终端	3	17	终端
8	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	2	7	普通	3	11	终端	5	15	普通
9	家具制造业	1	18	终端	1	20	终端	2	22	终端
10	造纸和纸制品业	9	0	普通	12	0	源	15	1	源
11	印刷和记录媒介复制业	1	8	普通	2	8	终端	2	8	终端
12	文教、美工、体育和娱乐用品制造业	0	14	终端	0	13	终端	4	15	普通
13	石油、煤炭及其他燃料加工业	4	0	普通	8	0	普通	12	0	源
14	化学原料和化学制品制造业	16	0	源	20	0	源	21	0	源
15	医药制造业	1	0	边缘	1	1	边缘	5	2	边缘
16	化学纤维制造业	11	1	源	10	1	源	12	0	源
17	橡胶和塑料制品业	18	8	核心	18	8	核心	19	13	核心
18	非金属矿物制品业	8	0	普通	11	0	源	15	0	源
19	黑色金属冶炼和压延加工业	12	0	源	14	0	源	15	0	源
20	有色金属冶炼和压延加工业	16	0	源	17	0	源	17	0	源
21	金属制品业	16	8	核心	17	6	核心	17	7	核心

续表 5.2 产业间技术创新溢出网络相关指标测算结果

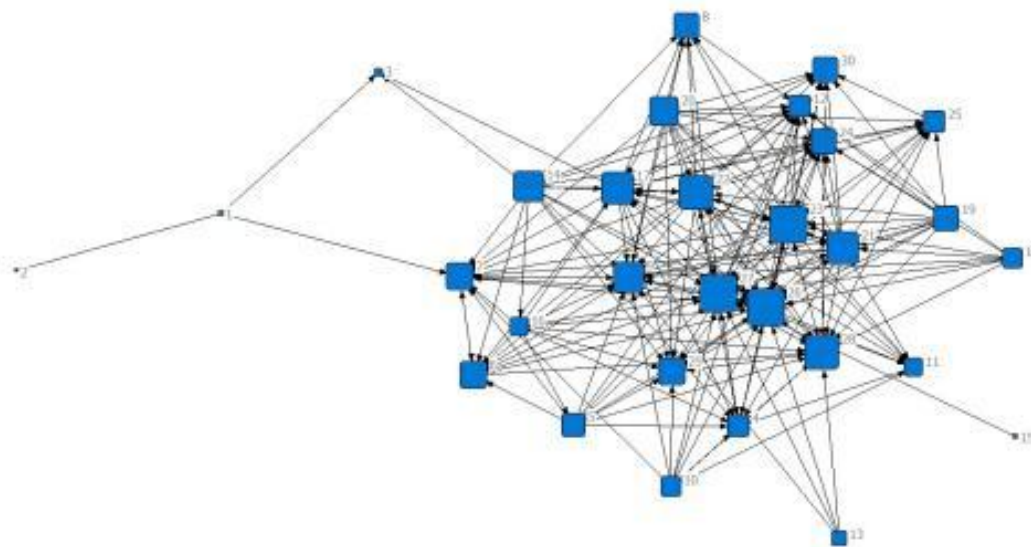
序号	行业	2017 年			2018 年			2020 年		
		出度	入度	角色	出度	入度	角色	出度	入度	角色
22	通用设备制造业	17	11	核心	17	12	核心	18	12	核心
23	专用设备制造业	17	11	核心	16	14	核心	17	17	核心
24	汽车制造业	8	13	核心	7	13	核心	8	18	核心
25	铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	6	10	普通	5	9	普通	7	12	普通
26	电气机械和器材制造业	16	17	核心	15	18	核心	16	19	核心
27	计算机、通信和其他电子设备制造业	17	19	核心	17	15	核心	17	19	核心
28	仪器仪表制造业	8	18	核心	8	21	核心	9	24	核心
29	其他制造业	0	13	终端	2	15	终端	2	17	终端
30	金属制品、机械和设备修理业	0	12	终端	0	15	终端	0	15	终端
均值 (M)		7.533	7.533		8.333	8.333		9.733	9.733	
标准差 (SD)		6.448	6.428		6.472	6.973		6.444	7.865	
最大值		18	19		20	21		21	24	
最小值		0	0		0	0		0	0	
总和		226	226		250	250		292	292	
网络密度 (D)		0.2598			0.2874			0.3322		
群体中心性 (H)		0.373	0.409		0.416	0.452		0.402	0.509	

(3) 溢出效应网络图分析

使用 Netdraw 将技术创新对制造业产业间碳排放的溢出关系可视化, 节点的大小和行业中心化的程度成正比, 节点越大, 中心化程度越高, 溢出路径越多, 技术创新对碳排放的溢出效应就越大。如图 5.1、5.2、5.3 所示, 在三年的溢出网络图中, 电气机械和器材制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业、仪器仪表制造业和其他制造业与其他行业的连接最多, 是溢出网络的中心, 为其他行业输出技术以降低其他产业的碳排放, 是降低碳排放中的技术溢出的传导者。

在图 5.1 中, 即 2017 年制造业技术创新对碳排放的溢出效应网络图中, 27 计算机、通信和其他电子设备制造业、26 电气机械和器材制造业、28 仪器仪表制造业是整个溢

出效应网络的核心产业，既能够将自身的先进技术溢出到下游行业从而对下游行业的碳排放产生影响，也能够从上游行业吸收到技术创新，以降低自身行业的碳排放。14 化学原料和化学制品制造业与其他制造业行业的联系也较为紧密，能够将自身的技术创新溢出到下游行业从而对下游行业的碳排放产生影响。2 食品制造业、15 医药制造业在溢出效应网络图中与其他产业发生的联系较少，既不能够将自身的技术创新溢出到下游行业从而对下游行业的碳排放产生影响，也不能够从上游行业吸收到技术创新，以降低自身行业的碳排放。



注：图中序号和表 3.2 中的序号所对应的行业相同（下同）

图 5.1 2017 年制造业技术创新对碳排放的溢出效应网络图

在图 5.2，即 2018 年制造业技术创新对碳排放的溢出效应网络图中，产业之间技术创新对碳排放的溢出路径明显增加，27 计算机、通信和其他电子设备制造业、26 电气机械和器材制造业、28 仪器仪表制造业依然处于溢出效应网络图中的核心地位，充当了技术中介的作用，对下游行业的碳排放产生影响，同时也受到上游行业技术创新对自身碳排放的影响。10 造纸和纸制品业、18 非金属矿物制品业的地位发生了变化，这两个行业的技术创新对下游行业碳排放的溢出路径都增加了三条，从而降低了三条路径所对应的三个行业的碳排放。

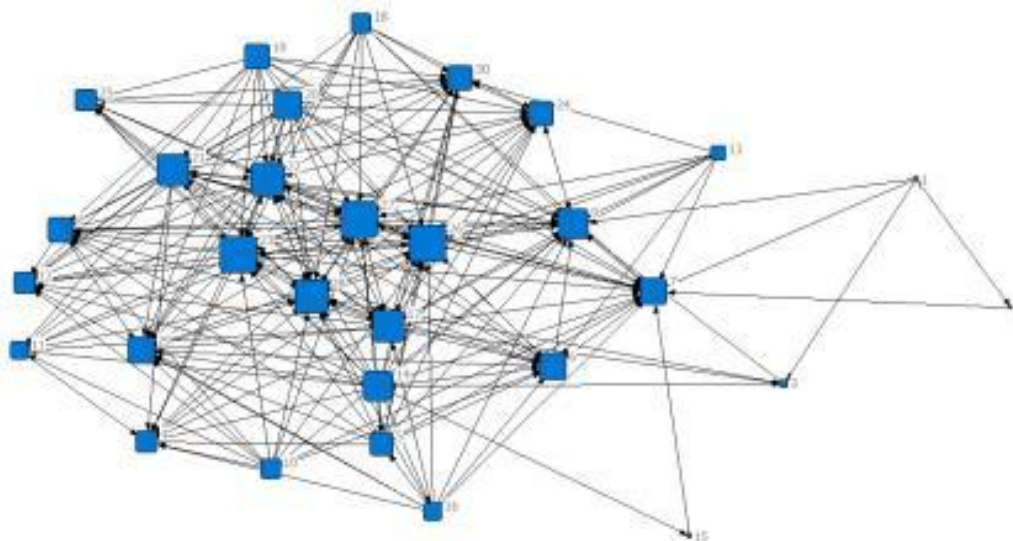


图 5.2 2018 年制造业技术创新对碳排放的溢出效应网络图

在图 5.3，即 2020 年制造业技术创新对碳排放的溢出效应网络图中，27 计算机、通信和其他电子设备制造业、26 电气机械和器材制造业、28 仪器仪表制造业依然处于溢出效应网络图中的核心地位。2020 年，3 酒、饮料和精制茶制造业和 12 文教、美工、体育和娱乐用品制造业的技术创新对上下游行业碳排放的溢出路径、吸收路径均增加，而 13 石油、煤炭及其他燃料加工业只有技术创新对下游行业碳排放的溢出路径增加。

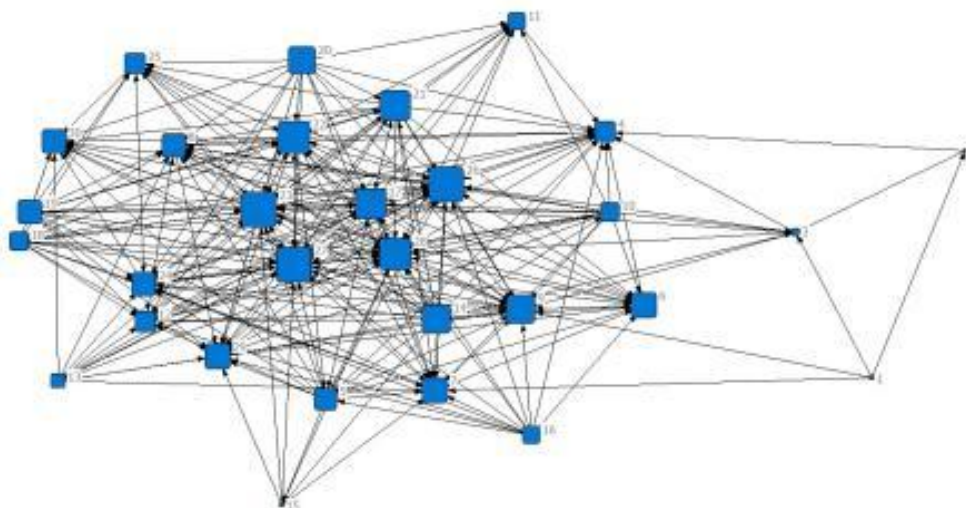


图 5.3 2020 年制造业技术创新对碳排放的溢出效应网络图

(4) 溢出路径分析

针对图 5.1、5.3、5.3 可分析出技术创新对制造业行业碳排放的具体溢出路径，以两条具体路径为例，其一为：计算机、通信和其他电子设备制造业→专用设备制造业→木

材加工和木、竹、藤、棕、草制品业→家具制造业。计算机、通信和其他电子设备制造业作为制造业碳排放的技术溢出核心，他可以为专用设备制造业提供高科技产品，专用设备制造业可利用高科技产品来优化自己的生产流程，例如专用设备制造业生产的设备可以通过其上游行业（计算机、通信和其他电子设备制造业）所提供的传感器等高科技产品在生产线上获取各种各样的数据进行分析，改善生产过程中生产要素等资源的分配，提高生产效率并减少不必要的停机时间，从而减少该行业的能源消耗，降低该行业二氧化碳的排放。同时专用设备制造业为纺织业提供智能化、自动化设备，纺织业在利用智能化、自动化设备生产化纤、丝绸、麻纺织等布料时，可以减少因人工操作所导致的机器待机时间，提高生产效率，减少能源使用，降低碳排放。木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业因使用智能化、自动化设备对产品的加工程度会更高，可为其下游行业的家具制造业提供可直接使用的中间商品，而不需要家具制造业再次对上游行业的产品进行二次加工，进一步减少了家具制造行业的能源使用量，从而降低家具制造行业的碳排放。

其二为：电气机械和器材制造业→通用设备制造业→纺织业→纺织服装、服饰业。技术创新推动了电气机械和器材制造业的发展，随着技术的快速发展和应用，电气机械和器材制造业不断引入先进的生产技术。例如，绿色发电技术在电力设备、电动机上的应用，可使得该行业生产的产品从火力发电为主转变为绿色资源发电，当这些设备进入下游行业通用设备制造业时，可以为通用设备制造业在生产产品的过程中节约大量的化石能源的消耗，从而减少通用设备制造业的碳排放。通用设备制造业下的纺织机械制造业是生产纺织设备的行业，主要包括纺纱机、织机、印染机等，当通用设备制造业的纺纱机、织机、印染机等实现智能化时，这些产品又可流入下游行业纺织业，使纺织业高效化运转，提高生产效率，减少纺织业的碳排放。同样纺织业利用智能化的纺织设备可为其下游行业的纺织服装、服饰业提供可直接使用的中间商品，而不需要纺织服装、服饰业再次对上游行业的产品进行二次加工，进一步减少了纺织服装、服饰业的能源使用量，从而降低纺织服装、服饰业的碳排放。

6 结论与建议

6.1 结论

立足于中国技术高速发展和双碳目标任务紧迫这一典型事实,本文基于 2013—2020 年中国制造业 30 个行业的数据,在构建技术创新指数和碳排放效率指标的基础上,多维度实证检验了制造业技术创新对碳排放的影响,又借助社会网络分析法利用溢出矩阵测算了溢出效应的大小总结了溢出效应在制造业行业间的传导路径。主要结论如下:

(1) 基于熵值法从创新投入、创新产出、创新支撑三个方面对技术创新指数构建指标体系,制造业中技术创新指数较高的行业多为高技术行业,其余的多为劳动密集型和资本密集型行业。基于碳排放系数法计算制造业 30 个行业的碳排放量,发现资本密集型行业的碳排放量远远高于技术密集型行业和劳动密集型行业。

(2) 通过空间杜宾模型的估计结果发现技术创新短期内对制造业碳排放效率在总体上呈现抑制作用,也就是说短期内技术创新可增加制造业的碳排放。间接溢出效应分解发现,本行业技术创新对上下游行业的碳排放效率存在显著的正向溢出效应,也就是本行业的技术创新可以减少上下游行业的碳排放量。并且在三种技术创新水平不同的行业中发现技术创新高水平行业的技术能够对上下游行业的碳排放效率产生正向的溢出效应,也就是降低上下游行业的碳排放量,技术创新中水平行业的技术只能对下游行业的碳排放有溢出效应对上游行业没有溢出效应。而技术创新低水平行业的技术对上下游行业产生的溢出效应均不显著。

(3) 通过构造溢出效应、吸收效应矩阵发现,技术创新对制造业碳排放的溢出效应和吸收效应较高的前三个行业为电气机械和器材制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业等技术密集型行业、仪器仪表制造业。

(4) 从整体来看,随着时间的推移,技术创新对制造业上下游产业之间的碳排放溢出的联系程度逐渐加强。但技术创新对下游行业碳排放的溢出效应与对上游行业的吸收效应在制造业各产业之间呈现较为不均衡的分布。从个体来看,金属制品业、通用设备制造业、橡胶和塑料制品业、计算机、通信和其他电子设备制造业、电气机械和器材制造业、汽车制造业、仪器仪表制造业、专用设备制造业这 7 个行业能够将自身的技术创新溢出到其下游行业从而对下游行业的碳排放产生影响,也能够从上游行业吸收到技术创新,以降低自身行业的碳排放。而纺织业、化学原料和化学制品制造业、化学纤维

制造业、黑色金属冶炼和压延加工业、有色金属冶炼和压延加工业 6 个行业的技术创新对下游行业碳排放的溢出效应较大且不从上游行业中吸收溢出效应。

(5) 通过溢出效应网络图发现随着时间的推移, 制造业产业之间技术创新对碳排放的溢出路径明显增加。以前两个行业为例可从溢出效应网络图中分析出制造业技术创新对碳排放的两条具体溢出路径: ①计算机、通信和其他电子设备制造业→专用设备制造业→木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业→家具制造业②电气机械和器材制造业→通用设备制造业→纺织业→纺织服装、服饰业。

6.2 建议

针对上述研究分析, 技术创新能有效降低上下游行业的技术创新, 为有效助推我国实现碳减排, 促进制造业低碳发展, 应加大绿色技术创新, 增强产业间溢出效果; 重视产业关联溢出, 打造低碳产业链条; 借助产业关联溢出效应推进碳减排。

(1) 加大绿色技术创新, 增强产业间溢出效果。在创新驱动发展战略下, 企业应增加绿色技术研发的经费, 让技术创新能够更好地支撑绿色增长的产业; 通过制定法律法规让政府加大对环保组织的监管力度, 在资金, 信息等方面给予支持, 缩短绿色专利的申请时间, 加强环保部门与社会企业等团体的联系, 并建立项目共享机制、沟通协调机制、信息共享机制, 大力推广绿色技术, 拓宽产业间绿色技术溢出的渠道, 加强核心企业对上下游企业的溢出效应, 通过产业关联溢出效应降低整个行业的碳排放。

(2) 重视产业关联溢出, 打造低碳产业链条。从实证分析可以看出技术创新能够降低上下游行业的碳排放, 一个行业若拥有较高的技术创新能力, 可以给上游行业提供更先进的技术, 使上游行业的生产更加有效率, 从而减少碳排放, 同样可以给下游企业提供更加环保的中间产品或技术, 减少下游行业的碳排放。在打造低碳产业链条的过程中, 首先要做的就是确定目标为降低碳排放, 提高能源的利用效率, 目标可以为制造业低碳产业链条的发展确立明确的方向, 保证制造业在整个发展过程中不偏航。确立目标后企业应积极投入到研发阶段, 重点研究低碳技术, 提升产品的质量和技术含量, 也提高自身的竞争力。此外, 还应对材料选择进行严格的检测和评估, 确保所选材料符合低碳标准, 借助产业溢出效应引导整个产业链绿色化、低碳化转型, 从而构建出真正符合低碳理念的产业链。

(3) 借助产业关联溢出效应推进碳减排。根据社会网络分析结果, 加强技术密集型行业中的电气机械和器材制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业等技术密集型

行业作为溢出网络中心的作用，更好地将技术溢出到其他行业，以降低其他行业的碳排放。因此，在产业体系中，应优先推动技术密集型行业的技术创新，技术创新是推动技术密集型行业发展的关键动力，而实现这一目标的首要前提在于加大研发投入，企业、政府必须增大对技术密集型行业的投资力度才能使这些行业的新技术、新生产方式、新产品得以持续进行研发。此外，还应该鼓励高校、科研机构与这些行业进行合作，共同开展研发活动，实现技术创新上面的溢出，并通过其强大的关联效应提上其他行业的技术创新水平，带动其他产业的碳排放的降低。

参考文献

- [1] Acemoglu D.,Aghion P.,Bursztyn L.,etc.The environment and directed technical change[J].American economic review,2012,102(1):131-66.
- [2] Cao S,Nie L,Sun H, et al. Digital Finance,Green Technological Innovation and Energy-environmental Performance:Evidence from China's Regional Economies[J].Journal of Cleaner Production,2021:129-458.
- [3] Driessen P H,Hillebrand B.Adoption and Diffusion of Green Innovations[M].2002.
- [4] Erik D,Bart L.Externalities of R&D Expenditures[J].Economic Systems Research,2002,14(4):407—425.
- [5] Goralski M A,Tan T K.Artificial Intelligence and Sustainable Development[J].The International Journal of Management Education,2020,18:100-330.
- [6] Goulder L H,Schneider S H.Induced technological change and the attractiveness of CO₂ abatement policies[J].Resource and Energy Economics,1999,21(3-4):211-253.
- [7] Kaplan J O,Krumhardt K M,Ellis E C,et al.Holocene carbon emissions as a result of anthropogenic land cover change:[J].Holocene,2011,21(5):775-791.
- [8] Li X,Ma D.Financial agglomeration, technological innovation, and green total factor energy efficiency[J].Alexandria Engineering Journal,2021,60(4):4085-4095.
- [9] Lin M,Yang Y.Environmental Regulation and Technology Innovation:Evidence from China[J].Energy Procedia,2011,5:572-576.
- [10] Mary,M,Crossan,et al.A Multi-Dimensional Framework of Organizational Innovation: A Systematic Review of the Literature[J].Journal of Management Studies,2010,47(6): 1154-1191.
- [11] Meng Hui Liu,Kun Kun Xue. An Empirical Study on China's Energy Consumption, Carbon Emissions and Economic Growth[J].Advanced Materials Research,2013,869-870:377-380.
- [12] Ooba M,Hatashi K,Fujii M,et al.A long-term assessment of ecological-economic sustainability of woody biomass production in Japan[J].Journal of cleaner production, 2015,88:318—325.
- [13] Sandeep,Kapur.Technological Diffusion with Social Learning[J].The Journal of Industrial Economic.1995,2:173-195.

- [14] Xu Q, Zhang M, Cao M. Does digital investment affect carbon efficiency? Spatial effect and mechanism discussion[J]. Science of The Total Environment, 2022, 827: 154-321.
- [15] Yang L., Li Z. Technology advance and the carbon dioxide emission in China-Empirical research based on the rebound effect[J]. Energy Policy, 2017, 101: 150-161.
- [16] Zhang X P, Cheng X M. Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China[J]. Ecological Economics, 2009, 68(10): 2706-2712.
- [17] Zwaan B, Gerlagh R, Klaassen G. Endogenous technological change in climate change modelling[J]. Energy economics, 2002, 24(1): p.1-19
- [18] Kumar S, Managi S. Energy Price-induced and Exogenous Technological Change: Assessing the Economic and Environmental Outcomes[J]. Resource and Energy Economics, 2009, 31(4): 334-353.
- [19] 曹新颖, 刘骏. 基于改进的索洛余值的建筑业技术创新测度[J]. 统计与决策, 2019, 35(24): 81-84.
- [20] 陈晓红, 胡东滨, 曹文治, 梁伟, 徐雪松, 唐湘博, 汪阳洁. 数字技术助推我国能源行业碳中和目标实现的路径探析[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(09): 1019-1029.
- [21] 程晨. 技术创新溢出与企业全要素生产率——基于上市公司的实证研究[J]. 经济科学, 2017, (06): 72-86.
- [22] 樊星. 中国碳排放测算分析与减排路径选择研究[D]. 辽宁大学, 2013.
- [23] 龚利, 屠红洲, 龚存. 基于 STIRPAT 模型的能源消费碳排放的影响因素研究——以长三角地区为例[J]. 工业技术经济, 2018, 37(08): 95-102.
- [24] 郭国强. 空间计量模型的理论和应用研究[D]. 华中科技大学, 2013.
- [25] 韩先锋, 陈龙涛, 宋文飞等. 碳排放对绿色技术创新驱动产业升级的动态调节机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(12): 60-70.
- [26] 金培振, 张亚斌, 彭星. 技术进步在二氧化碳减排中的双刃效应——基于中国工业 35 个行业的经验证据[J]. 科学学研究, 2014, 32(05): 706-716.
- [27] 李凯杰, 曲如晓. 技术进步对中国碳排放的影响——基于向量误差修正模型的实证研究[J]. 中国软科学, 2012, (06): 51-58.
- [28] 林善浪, 张作雄, 刘国平. 技术创新、空间集聚与区域碳生产率[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(05): 36-45.

- [29]刘婧玲,陈艳莹.数字技术发展、时空动态效应与区域碳排放[J].科学学研究,2023,41(05):841-853.
- [30]卢娜,王为东,王淼等.突破性低碳技术创新与碳排放:直接影响与空间溢出[J].中国人口·资源与环境,2019,29(05):30-39.
- [31]吕平,袁易明.产业协同集聚、技术创新与经济高质量发展——基于生产性服务业与高技术制造业实证分析[J].财经理论与实践,2020,41(06):118-125.
- [32]明娟,卢小玲.技术创新加剧了企业技能短缺吗?[J].北京交通大学学报(社会科学版),2021,20(01):76-86.
- [33]潘文卿,李子奈,刘强.中国产业间的技术溢出效应:基于 35 个工业部门的经验研究[J].经济研究,2011,46 (07):18-29.
- [34]宋培,李琳,艾阳,等.中国数字经济创新发展的技术选择与效果评估 [J].科学学研究,2023, 41 (08): 1410-1421.
- [35]孙振清,刘保留,李欢欢.产业结构调整、技术创新与区域碳减排——基于地区面板数据的实证研究[J].经济体制改革,2020,(03):101-108.
- [36]唐松,伍旭川,祝佳.数字金融与企业技术创新——结构特征、机制识别与金融监管下的效应差异[J].管理世界,2020,36 (05):52-66+9.
- [37]万攀兵,杨冕,陈林.环境技术标准何以影响中国制造业绿色转型——基于技术改造的视角[J].中国工业经济,2021,(09):118-136.
- [38]王敏,辜胜阻.我国高技术产业的关联效应研究[J].软科学,2015,29(10):1-5.
- [39]王庆喜,王巧娜,徐维祥.我国高技术产业省际知识溢出:基于地理和技术邻近的分析 [J].经济地理,2013,33(05):111-116+136.
- [40]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,2010,27(07):36-44.
- [41]吴卫红,蔡海波,刘佳等.技术创新双重效应与重污染行业绿色转型升级——基于碳排放的视角[J].经济与管理研究,2023,44(11):45-61.
- [42]熊广勤,石大千,李美娜.低碳城市试点对企业绿色技术创新的影响[J].科研管理,2020,41(12):93-102.
- [43]徐德义,马瑞阳,朱永光.技术进步能抑制中国二氧化碳排放吗? ——基于面板分位数模型的实证研究[J].科技管理研究,2020,40(16):251-259.
- [44]徐佳,崔静波.低碳城市和企业绿色技术创新[J].中国工业经济,2020(12):178-196.
- [45]徐建中,谢晶,李迪.科学发展观视域下我国区域技术创新水平测度与评价——基于循

- 环修正思想的实证研究[J].系统工程,2014,32(07):12-19.
- [46]杨浩昌,钟时权,李廉水.绿色技术创新与碳排放效率:影响机制及回弹效应[J].科技进步与对策,2023,40(08):99-107.
- [47]杨世兵,何邕健.中国县域经济发展对碳排放的影响研究[J].西部人居环境学刊,2021,36(06):16-22.
- [48]杨友才,耿璐璐,史倩姿.我国高技术产业间技术创新效率溢出效应——基于 GVAR 模型的研究[J].管理评论,2020,32(06):138-149.
- [49]张杰,杨连星,新夫.房地产阻碍了中国创新么?——基于金融体系贷款期限结构的解释[J].管理世界,2016(05):64-80.
- [50]张竣喃,逯进,周惠民.技术创新、产业结构与金融发展的耦合效应研究——基于中国省域数据的实证分析[J].管理评论,2020,32(11):112-127.
- [51]赵凡,罗良文.长江经济带产业集聚对城市碳排放的影响:异质性与作用机制[J].改革,2022(01):68-84.
- [52]赵巧芝,刘倬璇,崔和瑞.中国高新技术产业技术创新效率测度及空间收敛研究[J].统计与决策,2023,39(01):183-188
- [53]赵玉焕,钱之凌,徐鑫.碳达峰和碳中和背景下中国产业结构升级对碳排放的影响研究[J].经济问题探索,2022(03):87-105.
- [54]周剑.我国高技术产业创新效率影响因素分析[J].中国高新区,2018(4):1-6.
- [55]朱平芳,项歌德,王永水.中国工业行业间 R&D 溢出效应研究[J].经济研究,2016,51(11):44-55.

致谢

在兰财的时光始于金秋，也将于落幕于 2024 年的盛夏，2021 年我怀着忐忑的心情来到兰州，第一次来西北的我被连绵起伏的山峰所震撼，前一年半一直在封校中度过，研二下学期才开始真正领略西北的风土人情，遇到过火车站帮我搬行李箱的大哥，因为快要打烊不收我钱的老板，主动向我介绍兰州的出租车司机等等，这里的人真的让人能感受到温暖。到研三上半学期我又被兰州的美食所迷惑住，犂羊、犂巴郎、小北家、大自然等成为了我的心头好。转眼来到 2024 年研三的下半学期，可以说 2024 年是比较“难过”的一年，我们像无头苍蝇一样冲撞在招聘市场，也经历了各种失败，但还好有了一个结果。回顾研究生三年的生活，有欢笑、有泪水、有迷茫，但每次负面情绪过后，总能重整心情再出发。

回顾这三年，我应该是让万老师最操心的一个学生，所以我非常感谢我的指导老师万永坤老师。万老师从我们一进入校园便引导我们确定自己的研究方向，每个周的组会对于有拖延症的我是一个很好的督促，在日后的小论文选题、大纲确定、小论文修改直到大论文的撰写和修改，万老师都给与我悉心的教诲和无私的帮助，这些教诲使我终生受益。同时也非常感谢在兰财遇到的其他每一位老师，老师们对待学术严谨的态度值得我去学习。

其次，我要感谢我的家人。他们让我在读研期间没有经济压力，并且给予我精神上的支持，在我遇到困难的时候和家人的一通电话总能让我的心情从阴转晴，并给我战胜困难的勇气。

最后，我要感谢我自己和我的朋友们。感谢自己的坚持，同时感谢朋友们每次都能耐心听我的碎碎念和对我的不离不弃。