

中国制造业碳排放强度收敛趋势及其驱动因素研究

游建民^{1,2}

1. 贵州省社会科学院 工业经济研究所, 贵州 贵阳 550002

2. 广州大学 经济与统计学院, 广东 广州 510006

DOI:10.61369/ASDS.2025050007

摘要： 推进制造业内部各细分行业碳排放强度向低水平区间收敛，对于精准施策、协同推进制造业整体降碳具有重要现实意义。本文基于2000–2021年中国制造业27个细分行业面板数据，通过构建 σ 收敛和 β 收敛模型，实证分析中国制造业碳排放强度收敛特征及其驱动因素。研究发现：整体制造业碳排放强度离散程度呈扩大趋势，不存在 σ 收敛现象。技术密集型制造业表现出明显局部 σ 收敛特征，劳动密集型和资本密集型制造业均呈现发散态势；整体制造业碳排放强度存在显著的绝对 β 收敛和条件 β 收敛特征，能源结构、能源效率和资本深化对制造业碳排放强度收敛产生正向影响，而企业平均规模和行业结构呈负向影响；三类制造业收敛模式存在显著差异，劳动密集型制造业收敛最快，资本密集型制造业收敛最慢，技术密集型制造业收敛速度居中。根据研究发现，本文针对性提出建立分类施策的政策体系和构建系统性的碳减排及收敛促进机制等政策建议。

关键词： 制造业；碳排放强度；收敛；驱动因素

Research on the Convergence Trend of Carbon Emission Intensity in China's Manufacturing Industry and Its Driving Factors

You Jianmin^{1,2}

1. Industrial Economics Research Institute, Guizhou Academy of Social Sciences, Guiyang, Guizhou 550002

2. School of Economics and Statistics, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006

Abstract： Promoting the convergence of carbon emission intensity across various subsectors within the manufacturing industry towards lower levels holds significant practical importance for implementing targeted policies and synergistically advancing the overall carbon reduction in the sector. Based on panel data from 27 subsectors of China's manufacturing industry between 2000 and 2021, this paper empirically analyzes the convergence characteristics of carbon emission intensity and its driving factors by constructing σ convergence and β convergence models. The research findings reveal that: The overall dispersion degree of carbon emission intensity in manufacturing shows an expanding trend, indicating no σ convergence. Technology-intensive manufacturing exhibits distinct localized σ convergence, while both labor-intensive and capital-intensive manufacturing display divergence trends. The overall manufacturing carbon emission intensity demonstrates significant absolute β convergence and conditional β convergence characteristics. Energy structure, energy efficiency, and capital deepening exert a positive influence on the convergence of manufacturing carbon emission intensity, whereas average enterprise size and industry structure have a negative impact. Significant differences exist in the convergence patterns of the three types of manufacturing: labor-intensive manufacturing converges the fastest, capital-intensive manufacturing converges the slowest, and technology-intensive manufacturing exhibits a moderate convergence speed. Based on the findings, this paper proposes targeted policy recommendations, including establishing a classified policy system and constructing a systematic mechanism to promote carbon reduction and convergence.

Keywords： manufacturing industry; carbon emission intensity; convergence; driving factors

引言

中国制造业在规模持续扩张、深度融入全球分工体系的过程中，长期面临“低端锁定”与“碳锁定”的双重困境挑战^[1]。这不仅制

基金项目：2023年度国家社会科学基金重点项目“传统制造业高端化低碳化发展的错位失衡与数字协同治理研究”（23CJY021）。

作者简介：游建民，贵州省社会科学院工业经济研究所，副研究员，博士，研究方向为低碳经济、绿色经济。

约了制造业向全球价值链中高端的攀升，也延缓了绿色化、低碳化转型步伐，导致能源消费量和碳排放强度长期居高不下。在此背景下，制造业形成了较为显著的“高物耗、高能耗、高碳排放、低效率”的粗放式、外延式发展模式^[2]，由能源消耗引致的碳排放量急剧攀升，对生态环境的影响日益凸显。中国制造业碳排放量在2000–2021年间从12.27亿吨激增至34.75亿吨^[3]，年均增速高达9.91%，已成为仅次于能源行业的第二大碳排放源^[4]。在制造业碳排放总量持续增长的同时，由于各细分行业在技术特征、要素密集度、发展阶段、政策响应速度以及资源禀赋利用效率等方面存在巨大差异，其碳排放强度呈现出较为明显的差异性，行业间差距及其动态演变趋势日益复杂化。这种行业内部的巨大分异，使得整体制造业绿色低碳转型面临严峻挑战。

2020年“双碳”战略目标提出后，我国逐步构建起完善的碳达峰“1+N”政策体系，明确要求“全国一盘棋”“根据各地实际分类施策”^[5]。对于制造业这一关键领域而言，实现碳达峰碳中和的核心路径在于推动产业规模增长与碳排放深度脱钩。从收敛的含义上讲，这意味着各行业的碳排放强度在达峰后能持续下降，并最终收敛至一个稳定且较低的水平区间——即行业间碳排放强度的差距不断缩小，从而实现整体向低碳高效发展模式的趋同。因此，科学识别中国制造业内部细分行业碳排放强度是否存在收敛趋势、呈现何种收敛模式（绝对收敛还是条件收敛），并深入探究驱动或阻碍了这一收敛过程的关键因素，对于精准施策、协同推进制造业整体低碳转型具有重要的现实意义。

制造业作为国民经济的重要支柱，其碳排放强度成为经济社会全面绿色转型的重要指标，逐渐成为专家学者关注的重要议题。近年来，关于中国制造业碳排放强度研究逐渐增多，并取得了较为丰富的成果，在制造业碳排放强度测算方法和特征分析方面形成了较为成熟的理论框架^[6,7]。然而，当前研究多集中于总量特征分析，并指行业间差异的存在及其与能源结构、行业结构、外资利用、技术进步等的关联^[6,8,9]，但对制造业内部细分行业碳排放强度的收敛规律及其驱动因素分析尚显不足。本文通过回答以下几个核心问题：中国制造业碳排放强度在长期内是否存在 σ 收敛和 β 收敛趋势？驱动其收敛的关键因素是什么？考虑到行业异质性，劳动密集型、资本密集型、技术密集型等类型行业的收敛路径与驱动机制是否存在显著差异？对这些问题的深入探究，将为制定差异化、精准化的制造业碳减排政策，落实全国降碳一盘棋提供坚实的科学依据。

一、研究设计

（一） σ 收敛分析

离散程度是分析检验制造业碳排放强度 σ 收敛的重要指标。如果制造业碳排放强度的离散程度虽时间的推移呈现逐年缩小的态势，则表明其存在 σ 收敛。反之，则不存在 σ 收敛。本文采用变异系数动态测度制造业内部细分行业的碳排放强度离散程度。

$$CV_t = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ln CI_{it} - \overline{\ln CI_t})^2}{\overline{\ln CI_t}}} \quad (1)$$

其中， i 为细分行业， CV 代表制造业碳排放强度的变异系数， CI 代表制造业碳排放强度， $\overline{CI}$ 代表制造业碳排放强度的平均值， N 代表制造业内部细分行业总数， $\ln$ 代表去自然对数。若

$\frac{\partial CV_t}{\partial t} < 0$ ，且通过显著性检验（ $p < 0.05$ ），则存在 σ 收敛。

（二） β 收敛分析

β 收敛分析分为两种：绝对 β 收敛分析和条件 β 收敛分析。

1. 绝对 β 收敛分析

绝对 β 收敛是指制造业内部每个细分行业的碳排放强度呈现完全一致的稳态增长趋势。高碳排放强度的行业，其碳排放增长率快于低碳排放强度的行业。具体检测公式如下：

$$\Delta \ln CI_{it} = \alpha + \beta \ln CI_{i,t-1} + \lambda_i + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中， i 为细分行业， $\Delta \ln CI_{it} = \ln CI_{it} - \ln CI_{i,t-1}$ ，表为 i 行业碳

排放强度在 t 年的平均增长率， $\ln CI_{it}$ 和 $\ln CI_{i,t-1}$ 为 i 行业在 t 和 $t-1$ 年的碳排放强度， α 为截距项， β 为碳排放强度的回归系数， $\beta < 0$ 表示存在收敛，收敛速度 $s = -\frac{\ln(1+\beta)}{\Delta t}$ ， λ_i 、 μ_i 、 ε_{it} 分别表示制造业碳排放强度的行业固定效应、时间固定效应以及其他干扰项。

2. 条件 β 收敛分析

条件 β 收敛分析是指是指在考虑行业特性和外部影响因素的基础上，制造业各细分行业的碳排放强度逐渐趋向各自的稳态水平。具体来说，行业的初始碳排放强度水平会对碳排放强度的变化产生一定影响，但这种影响会随着时间的推移逐渐减少。在绝对 β 收敛模型基础上，引入了对碳排放强度变动具有影响的条件变量，例如能源结构、研发强度、行业结构等因素，便构成了条件 β 收敛模型。具体检验公式如下：

$$\Delta \ln CI_{it} = \alpha + \beta \ln CI_{i,t-1} + \sum_{k=1}^6 r_k \ln X_{k,it} + \lambda_i + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中， $X_{k,it}$ 代表控制变量，包含能源结构（ES）、能源效率（EE）、企业平均规模（Size）、资本深化（KL）、行业结构（STR）和研发强度（RD）等6个因素，其他变量含义同上。能源结构（ES）与能源效率（EE）作为核心路径直接影响收敛。在能源结构中，煤炭占比高，将增加减排难度阻碍行业碳强度收敛，而能源利用率提升则促进低碳技术扩散，加速收敛进程。企业规模（Size）通过规模效应发挥作用，大规模企业更强的减排投资能力有助于推动收敛。资本深化（KL）对制造业碳排放收敛存在双重影响：一方面可能因技术升级（如先进设备替代）促进收敛，

另一方面也可能因高碳设备的“锁定效应”延缓转型，阻碍收敛。行业结构（STR）反映产业结构升级，高技术产业占比提高能显著降低整体排放强度，是促进收敛的关键因素。研发强度（RD）则通过驱动低碳技术创新与应用，为加速收敛提供持续动力。

（三）制造业行业类别划分

为揭示制造业碳排放强度收敛的异质性特征，依据行业的要素密度，参照钟世川和毛艳华^[10]的研究，将制造业内部27个细分行业划分为劳动密集型、资本密集型和技术密集型等3大类。其中，劳动密集型行业以劳动力投入为主，碳排放强度受产业结构升级和劳动力替代的影响较大；资本密集型行业依赖大量固定资产投入，其碳排放水平主要受到设备更新和生产效率的影响；而技术密集型行业则以高研发投入和技术创新为特征，碳排放强度变化更多取决于技术进步和能源利用效率的提升。具体标准划分如表1。

表1 制造业行业类别划分

行业类别	具体行业
劳动密集型	农副食品加工业 食品制造业 纺织业 纺织服装、鞋、帽制造业 皮革、毛皮、羽毛（绒）及其制品业 木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业 家具制造业 文教体育用品制造业
资本密集型	饮料制造业 烟草制品业 造纸及纸制品业 印刷业和记录媒介的复制 石油加工、炼焦及核燃料加工业 化学原料及化学制品制造业 化学纤维制造业 橡胶和塑料制品业 非金属矿物制品业 黑色金属冶炼及压延加工业 有色金属冶炼及压延加工业 金属制品业 通用设备制造业 交通运输设备制造业
技术密集型	医药制造业 专用设备制造业 电气机械及器材制造业 通信设备、计算机及其他电子设备制造业 仪器仪表及文化、办公用机械制造业

（四）数据来源及说明

本文采用2000–2021年中国制造业27个细分行业的平衡面板数据，核心变量构建如下：（1）碳排放强度（CI）通过行业碳排放量与可比价制造业总产值的比值计算，其中27个细分行业碳排放量来源于CEADs数据库；（2）控制变量数据中，能源结构（煤炭消费占比）与能源效率（单位总产值能耗）源自《中国能源统计年鉴》，企业平均规模（主营业务收入/企业数）、资本深化（固定资产/从业人数）及行业结构（总产值占比）来源于《中国工业统计年鉴》，R&D强度（R&D经费内部支出/主营业务收入）来源于《中国科技统计年鉴》；（3）制造业总产值统一以2000年为基期，利用行业生产者出厂价格指数（PPI）平减为实

际值。在数据处理中，行业分类依据 GB/T 4754 标准进行历史口径衔接，对零星缺失值采用线性插值法填补。

表2 变量定义及数据来源

变量类型	变量	简写	测算方法	数据来源
被解释变量	制造业碳排放强度	CI	行业碳排放量 / 制造业总产值增	CEADs数据库、《中国能源统计年鉴》
核心解释变量	滞后碳排放强度	CI_{it-1}	滞后一期对数	计算生成
控制变量	能源结构	ES	煤炭消费量占比（%）	《中国能源统计年鉴》
	能源效率	EE	能源消费总量 / 制造业总产值增（吨标煤 / 万元）	《中国能源统计年鉴》
	企业平均规模	Size	主营业务收入 / 企业数（亿元 / 家）	《中国工业统计年鉴》
	资本深化	KL	固定资产 / 从业人员数（万元 / 人）	《中国工业统计年鉴》
	行业结构	STR	行业增加值占制造业总值比重（%）	《中国统计年鉴》
	研发强度	RD	R&D经费内部支出 / 主营业务收入（%）	《中国科技统计年鉴》

二、实证结果分析

（一）σ 收敛分析

基于前文 σ 收敛分析方法，本文对制造业碳排放强度离散程度进行测度，结果显示，不同类别制造业碳排放强度的收敛态势呈现出明显的差异性（图1）。从整体制造业发展态势来看，碳排放强度离散程度（CV）由2000年的2.100逐步攀升至2021年的2.810，这一变化趋势显示出制造业碳排放强度的离散程度在不断扩大，整体上并不存在 σ 收敛现象。

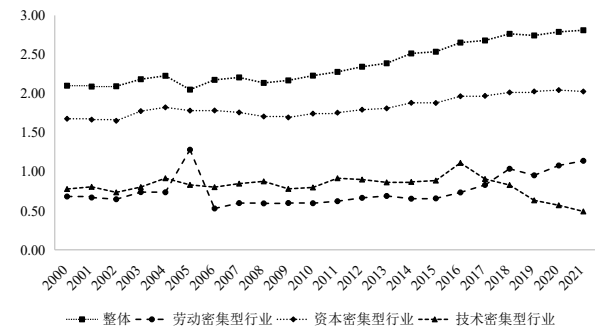


图1 中国制造业碳排放强度 σ 收敛趋势

从分行业类别分析来看。劳动密集型制造业的演变态势波动性较大。2005年 CV 值攀升至1.281，出现异常情况，之后，从2006年的0.529逐步上升至2021年的1.139，特别是2016年以来的上升趋势更为显著；资本密集型制造业则呈现出相对平稳但持续上升的态势，其 CV 值从2000年的1.677总体上升至2021年的2.026，期间虽有小幅波动但整体上升趋势明显；技术密集型制造业展现出与其他类型制造业截然不同的收敛模式。2000–2016年

期间，CV 值波动较为明显，而在2016年之后，其 CV 值再次下降，由2016年的1.112大幅下降至2021年的0.491，表现出典型的 σ 收敛特征。总的来看，在制造业各类型中，唯有技术密集型制造业内部的碳排放强度差异正在逐步缩小，呈现局部 σ 收敛，其他类型制造业均呈现出离散程度持续扩大的发散态势， σ 收敛趋势并不存在。

(二) β 收敛分析

根据 β 收敛分析方法，本文检验测度了整体制造业碳排放强度 β 收敛性。详见表3。检验结果显示，制造业碳排放强度存在显著的绝对 β 收敛特征。 $lnCI_{i,t-1}$ 系数为 -0.111，显著为负，表明碳排放强度较高的行业确实呈现更快的下降趋势，符合绝对 β 收敛的理论预期。模型的 R^2 为0.197，Hausman 检验统计量为5.232，在5%水平上显著，表明采用固定效应模型是合适的。这一结果说明，在不考虑其他影响因素的情况下，制造业内部各细分行业的碳排放强度正朝着共同的稳态水平收敛。

从条件 β 收敛结果来看，引入控制变量后，Hausman 检验仍支持采用固定效应模型。 $lnCI_{i,t-1}$ 系数为 -0.207，显著性和绝对值均高于绝对 β 收敛。这表明在控制其他因素后，制造业碳排放强度的收敛效应更加明显。在控制变量中，各变量的影响效应存在显著差异。从影响方向看，能源结构、能源效率和资本深化对碳排放强度收敛产生正向影响，而企业平均规模和行业结构呈负向影响，研发强度虽为负但不显著。比较来看，行业结构调整的减排效应最为显著，系数绝对值达2.317，远超其他变量，表明产业结构优化是降低碳排放强度的关键因素。其次是研发强度，尽管统计不显著但系数达 -1.427，显示技术创新的潜在重要性。能源效率的正向系数为0.304，表明当前制造业能源利用效率仍有较大提升空间。相比之下，企业规模和资本深化的影响相对较小，但资本深化的高显著性值得关注。

从 β 收敛速度来看，绝对 β 收敛速度为0.118，年收敛速度约为11.8%；条件 β 收敛速度为0.232，即年收敛速度约为0.232。条件 β 收敛速度明显高于绝对 β 收敛，这表明在考虑能源结构、能源效率、企业平均规模、资本深化、行业结构、研发强度等因素后，制造业碳排放强度的收敛进程显著加快。这意味着，通过优化能源结构、提升能源效率等政策措施，可以有效加速制造业碳排放强度向更低水平收敛的进程。

表3 整体制造业碳排放强度 β 收敛性检验结果

变量	绝对 β 收敛	条件 β 收敛
$lnCI_{i,t-1}$	-0.111*** (-11.51)	-0.207*** (-12.47)
能源结构 (ES)	——	0.21* (1.80)
能源效率 (EE)	——	0.304*** (7.07)
企业平均规模 (Size)	——	-0.003* (-1.92)
资本深化 (KL)	——	0.001*** (-3.50)
行业结构 (STR)	——	-2.317** (-2.04)
研发强度 (RD)	——	-1.427 (-1.28)
收敛速度 (s)	0.118	0.232
行业固定效应	Yes	Yes
时间固定效应	Yes	Yes
观测值	567	567

R^2	0.197	0.272
常数项	0.01 (1.08)	-0.033 (-0.61)
Hausman test	5.232**	46.949***

注：() 内的为 t 值；*、** 和 *** 分别表示在 10%、5% 和 1% 的置信水平下显著。

三、异质性分析

(一) 劳动密集型制造业

由表4来看，劳动密集型制造业碳排放强度表现出显著的绝对 β 收敛和条件 β 收敛特征。在绝对 β 收敛检验中， $lnCI_{i,t-1}$ 系数为 -0.516，显著为负，表明劳动密集型制造业内部细分行业存在明显的绝对收敛趋势。在控制变量中，能源效率 (EE) 系数为0.955且显著为正，这意味着能源效率的提升有助于促进收敛过程；而资本深化 (KL) 系数为 -0.001且显著为负，说明资本深化程度的差异会影响收敛速度。从收敛速度来看，得出绝对 β 收敛速度约为0.718，这意味着劳动密集型制造业各细分行业间的碳排放强度差距每年缩小约71.8%。在条件 β 收敛分析中，系数为 -0.936，同样显著为负，相比绝对收敛，其收敛速度提升至约150.8%。

(二) 资本密集型制造业

资本密集型制造业碳排放强度同样呈现显著的绝对 β 收敛和条件 β 收敛特征，但收敛模式与劳动密集型存在一定程度上的差异。从绝对 β 收敛检验结果来看， $lnCI_{i,t-1}$ 系数为 -0.01，虽然显著为负，但系数绝对值较小，收敛速度约为0.01，远低于劳动密集型行业。这表明资本密集型制造业内部碳排放强度的收敛过程相对缓慢。从条件 β 收敛检验结果来看， $lnCI_{i,t-1}$ 系数为 -0.177，收敛速度提升至约19.3%。在控制变量方面，能源效率 (EE) 和资本深化 (KL) 系数显著为正，企业平均规模 (Size) 系数显著为负。这表明，资本密集型制造业的收敛过程受到多重因素的复杂影响。

(三) 技术密集型制造业

技术密集型制造业表现出中等程度的收敛特征。从绝对 β 收敛检验结果来看， $lnCI_{i,t-1}$ 系数为 -0.131，在1%水平下显著为负，收敛速度约为0.14，介于劳动密集型和资本密集型之间。从条件 β 收敛检验结果来看， $lnCI_{i,t-1}$ 系数为 -0.363，收敛速度显著提升至约0.451。在控制变量中，能源效率 (EE) 和研发强度 (RD) 系数为正，这表明技术密集型制造业的收敛过程主要受到能源效率改进和研发投入增强的正向推动。研发强度的显著正效应体现了技术创新在促进碳排放强度收敛中的重要作用。

(四) 三类制造业碳排放强度收敛性的对比分析

综合比较三类制造业碳排放强度的收敛特征发现显著差异。从收敛速度看，劳动密集型制造业收敛最快，为0.718，技术密集型居中为0.14，资本密集型最慢为，0.01。在引入控制变量后，三类制造业的条件 β 收敛速度均有所提升，但相对排序保持不变。从收敛机制看，劳动密集型主要依靠能源效率提升和资本深化调整实现收敛；资本密集型受到企业规模、行业结构等多重因素的复杂影响，收敛过程较为缓慢；技术密集型则主要通过研发

创新和能源效率改进推动收敛。这种差异反映了不同要素密集度行业在碳减排路径和政策响应方面的异质性特征。

表 4 三类制造业碳排放强度 β 收敛性检验结果

变量	劳动密集型制造业		资本密集型制造业		技术密集型制造业	
	绝对 β 收敛	条件 β 收敛	绝对 β 收敛	条件 β 收敛	绝对 β 收敛	条件 β 收敛
$\ln CI_{i,t-1}$	-0.516*** (-7.79)	-0.936*** (-11.75)	-0.01*** (-10.12)	-0.177*** (-10.31)	-0.131*** (-5.55)	-0.363*** (-6.76)
能源结构 (ES)	——	-0.018 (-0.07)	——	0.295 (1.60)	——	0.064 (1.19)
能源效率 (EE)	——	0.955*** (4.08)	——	0.248*** (5.44)	——	0.219*** (4.14)
企业平均规模 (Size)	——	-0.028 (-0.49)	——	-0.003** (-2.02)	——	0.002 (0.71)
资本深化 (KL)	——	-0.001** (-0.79)	——	0.001*** (-3.46)	——	0 (-1.06)
行业结构 (STR)	——	0.615 (0.24)	——	-4.113** (-2.49)	——	-0.059 (0.71)
研发强度 (RD)	——	-3.862 (-2.26)	——	-4.996 (-1.44)	——	1.203** (2.37)
收敛速度 (s)						
行业固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
观测值	168	168	294	294	105	105
R ²	0.276	0.476	0.268	0.359	0.237	0.419

常数项	0.074*** (3.86)	0.09*** (0.94)	0.008 (0.82)	0.331*** (6.15)	0.061*** (3.86)	0.150*** (4.15)
Hausman test	4.052**	16.224	1.626	13.861***	4.861***	14.150***

注：() 内的为 t 值；*、** 和 *** 分别表示在 10%、5% 和 1% 的置信水平下显著。

潜在作用，而能源结构、企业规模等因素的影响相对有限。

四、研究结论与政策建议

本文基于 2000–2021 年中国制造业 27 个细分行业面板数据，构建 σ 收敛和 β 收敛模型，来实证分析中国制造业碳排放强度收敛特征及其驱动因素，并对其异质性进行分析。通过实证研究，得出以下主要结论：（1）从 σ 收敛角度看，整体制造业碳排放强度离散程度呈扩大趋势，不存在 σ 收敛现象，但技术密集型制造业在 2016 年后表现出明显的 σ 收敛特征，而劳动密集型和资本密集型制造业均呈现发散态势；（2）从 β 收敛角度看，制造业碳排放强度存在显著的绝对 β 收敛和条件 β 收敛特征，绝对收敛速度为 0.118，条件收敛速度达 0.232，表明通过政策干预可以有效加速收敛进程；（3）从三类制造业碳排放强度收敛态势来看，三类制造业收敛模式存在显著差异。劳动密集型制造业收敛最快，主要依靠能源效率提升和资本深化调整。资本密集型制造业收敛最慢，受多重因素复杂影响。技术密集型制造业收敛

根据上述研究结论，本文提出以下两方面的政策建议。首先，应建立分类施策的政策体系。针对技术密集型制造业展现出的良好收敛趋势，政策应着力加强对研发投入的支持和技术创新的激励，充分发挥该行业在整体制造业绿色转型中的引领作用。对于资本密集型制造业，鉴于其收敛进程相对较慢，应通过设备更新改造补贴、绿色金融支持等措施，帮助其突破“碳锁定”困境，推动其向低碳、绿色方向发展。而对于劳动密集型制造业，政策应注重提升能源效率和引导产业升级，避免其碳排放强度差异进一步扩展，确保其在绿色转型过程中逐步实现收敛。其次，应构建系统性的碳减排及收敛促进机制。此机制应重点推动产业结构的优化升级，进一步加大对高技术制造业的政策支持力度。同时，需建立和完善绿色技术创新体系，采取税收优惠、专项资金支持等政策工具，激励企业加大研发投入，提升绿色技术创新能力。在能源结构调整和能效提升方面，政策应进一步细化，推动形成涵盖技术标准、市场机制、财政支持的综合政策框架。通过精准施策和系统化推进，推动制造业碳排放强度的深度收敛，最终为实现“双碳”目标奠定坚实的政策基础。

参考文献

[1] 梁中，汪跃. 从“双重错位锁定”到“双元解锁”——中国传统制造业绿色转型情景与政策路径 [J]. 社会科学研究，2022，01): 68–76.

[2] 何文韬. “新常态”下制造业设备投资峰值波动及其内在机制研究——基于我国上市公司的微观视角 [J]. 产业经济研究，2016，05): 69–77.

[3] Xu J ,Guan Y ,Oldfield J , et al.China carbon emission accounts 2020–2021[J].Applied Energy, 2024, 360:122837–.

[4] 张继宏，程芳萍. “双碳”目标下中国制造业的碳减排责任分配 [J]. 中国人口·资源与环境，2021，31(09): 64–72.

[5] 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [N]. 2021–10–25.

[6] Dongdong L .Convergence of energy carbon emission efficiency: evidence from manufacturing sub-sectors in China.[J].Environmental science and pollution research international, 2022, 29(21):31133–31147.

[7] Xiaomeng Z ,Chu W .Inequality of carbon intensity in the Chinese manufacturing sector: The role of information and communication technology infrastructure[J].Structural Change and Economic Dynamics, 2024, 68:194–203.

[8] 付华，李国平，朱婷. 中国制造业行业碳排放：行业差异与驱动因素分解 [J]. 改革，2021，05): 38–52.

[9] 李新安，李慧. 外资引入、技术进步偏向影响了制造业的碳排放吗？——来自我国 27 个制造行业面板数据模型的实证检验 [J]. 中国软科学，2022，01): 159–70.

[10] 钟世川，毛艳华. 数字技术偏向下制造业行业生产率的收敛效应 [J]. 科学学研究，2024，42(12): 2509–18.