

中国对欧钢铁出口隐含碳排放的结构演化、 驱动机制及钢铁电商的潜在作用

张程程

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年12月30日; 录用日期: 2026年1月12日; 发布日期: 2026年2月27日

摘要

在欧盟碳边境调节机制(CBAM)逐步实施背景下, 中国钢铁产品对欧出口正面临日益严格的碳约束。本文基于2005~2024年中国对欧盟钢铁产品出口数据及欧盟CBAM公布的产品碳排放默认值, 测算中国对欧钢铁出口隐含碳排放水平及加权碳强度, 并利用赫芬达尔-赫希曼指数(HHI)刻画出口结构集中度的演变, 进一步采用对数平均迪氏指数法(LMDI)将隐含碳变化分解为规模效应与结构效应。研究发现, 中国对欧钢铁出口结构总体由“高碳集中”向“多元低碳化”方向演进, 高碳产品占比持续下降、中低碳产品比重稳步上升; 出口隐含碳排放的下降主要由规模效应主导, 结构效应发挥协同作用, 体现出钢铁出口由数量扩张向质量提升转型的特征。在此基础上, 本文从制度视角讨论了钢铁电商对出口结构调整的影响, 并指出平台化交易模式在一定程度上可为低碳产品改善市场可达性提供条件。

关键词

钢铁出口, 隐含碳, LMDI分解, 钢铁电商, CBAM, 低碳转型

Structural Evolution, Driving Mechanism and Potential Role of Steel E-Commerce of Embodied Carbon Emissions in China's Steel Exports to Europe

Chengcheng Zhang

School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: December 30, 2025; accepted: January 12, 2026; published: February 27, 2026

Abstract

Against the backdrop of the gradual implementation of the EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), China's steel product exports to the EU are confronting increasingly stringent carbon constraints. Based on the data of China's steel product exports to the EU from 2005 to 2024 and the default carbon emission values of products announced by the EU CBAM, this paper measures the level of embodied carbon emissions and weighted carbon intensity of China's steel exports to the EU. Meanwhile, it depicts the evolution of export structure concentration by applying the Herfindahl-Hirschman Index (HHI). Furthermore, the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) is adopted to decompose the changes in embodied carbon emissions into scale effect and structure effect. The research findings indicate that the overall structure of China's steel exports to the EU has evolved from a "high-carbon concentration" pattern to a direction of "diversification and low-carbonization", characterized by a continuous decline in the proportion of high-carbon products and a steady rise in the share of medium-and-low-carbon products. The reduction in embodied carbon emissions from exports is mainly driven by the scale effect, with the structure effect playing a synergistic role, which reflects the transformation of steel exports from quantity expansion to quality improvement. On this basis, this paper discusses the impact of steel e-commerce on the adjustment of export structure from an institutional perspective, and points out that the platform-based transaction model can, to a certain extent, provide conditions for low-carbon products to improve market accessibility.

Keywords

Steel Exports, Embodied Carbon, LMDI Decomposition, Steel E-Commerce, CBAM, Low-Carbon Transition

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与研究意义

在全球气候治理深化与国际贸易规则加速绿色化的背景下，碳排放正由环境议题转化为重要的贸易约束条件。欧盟自 2023 年启动碳边境调节机制(CBAM)过渡期，并逐步将钢铁等高碳产品纳入碳成本调节范围，使出口产品所隐含的碳排放成为影响贸易成本、市场准入与产品竞争力的重要因素。作为全球最大的钢铁生产国和出口国之一，中国钢铁产品对欧出口正日益受到碳排放强度与合规要求的约束，其出口结构与隐含碳排放水平已成为影响贸易可持续性与产业转型的关键问题。

出口隐含碳的变化不仅取决于出口规模本身，更取决于不同碳强度产品在出口结构中的配置方式。如果出口增长主要集中于高碳产品，则隐含碳排放将随规模同步上升；反之，若出口结构向低碳、高附加值产品调整，则有可能在保持贸易规模的同时降低碳排放强度。因此，从结构视角系统刻画出口隐含碳的演化特征，并区分规模变化与结构调整的相对作用，是理解钢铁出口低碳转型路径的重要前提。

钢铁产业作为典型的高能耗、高排放行业，其出口结构对隐含碳排放具有决定性影响。长期以来，中国钢铁出口以部分标准化、高碳产品为主，这既与产业技术路径和历史比较优势有关，也受到贸易制度安排、合规成本与信息不对称等因素制约。在 CBAM 等绿色贸易制度不断强化的背景下，中国钢铁出

口是否存在通过结构调整实现低碳转型的空间, 以及这一转型的现实约束与潜在路径何在, 亟需系统分析。

与此同时, 随着数字经济与产业互联网的发展, 钢铁电商等平台型交易模式正在改变钢铁产品的交易方式与市场结构。尽管现有研究多从技术路径与政策约束角度讨论钢铁行业低碳转型, 但数字化贸易制度如何影响不同碳强度产品的市场可达性与竞争条件, 仍缺乏系统分析。本文在分析出口隐含碳结构演化与驱动机制的基础上, 将钢铁电商作为一种制度背景纳入讨论, 以拓展对出口结构低碳化路径的理解。

1.2. 文献综述

钢铁碳排放核算与减排路径方面, Song 等从生命周期视角测算了中国钢铁行业碳排放并指出其高碳属性及减排潜力[1]; Wang 等通过脱钩分析发现钢铁行业碳排放与经济增长之间存在阶段性弱脱钩关系[2]; Zhang 等系统比较了多种低碳与近零碳技术路径, 认为流程重构与能源替代是实现深度减排的关键方向[3]; Xin 等基于案例研究表明节能技术与管理优化对短期减排具有显著效果[4]; 行业研究报告显示, 中国钢材出口结构近年来呈现由初级产品向中高端产品调整的趋势, 但高碳产品仍占据较大比重[5]; 另有研究从工业化与城镇化进程角度指出, 钢铁产品结构优化是实现产业升级与资源约束协调发展的重要路径[6]。

关于钢铁出口结构与贸易特征, 王志远指出中国钢铁出口长期以低附加值产品为主, 结构升级动力不足[7]; 刘京阳认为出口结构受国际需求与比较优势双重约束, 短期内调整空间有限[8]; 郑雨豪强调出口结构集中导致附加值偏低与摩擦风险上升[9]; 李雨佳从进出口整体格局出发指出结构调整是提升贸易质量的关键路径[10]; 罗璇通过中美贸易摩擦案例说明外部冲击会显著改变钢铁出口结构[11]; 周维富则从“双碳”目标视角强调出口结构优化对行业高质量发展的重要性[12]; 从外部环境角度看, 既有研究表明, 沿线国家基础设施条件的改善亦会对中国钢铁出口结构产生显著影响[13], 提示出口结构调整受多重外生因素共同作用。

在 CBAM 与绿色贸易壁垒方面, Liu 等基于双重差分模型发现 CBAM 将显著影响企业对外投资与生产布局决策[14]; 薄雅婕等从多维视角分析了 CBAM 对钢铁行业贸易、成本与竞争格局的综合影响[15]; 相关行业研究指出, 出口关税、退税政策与环保约束的协同调整, 已成为推动钢铁企业绿色转型和出口结构优化的重要政策工具[16]; 冶金财会编辑部从政策实践角度指出以高端化、低碳化应对 CBAM 约束是钢铁出口转型的重要方向[17]。这些研究表明 CBAM 将倒逼钢铁出口结构调整, 但对产品层面隐含碳变化缺乏直接刻画; 针对欧盟 CBAM 的影响, 已有研究指出该机制将通过碳成本传导, 对中国钢铁出口规模与结构产生系统性约束[18]。

相关研究从国际竞争力视角分析认为, 中国钢铁出口在价格优势逐步弱化的背景下, 亟需通过结构优化与附加值提升巩固其国际市场地位[19]; 汤莉指出, 全球需求收缩与国际市场不确定性上升, 对中国钢铁出口形成持续压力, 并在一定程度上加剧了出口结构调整的被动性[20]。

此外, 在技术创新与制度工具方面, 李晋等提出通过技术创新与路径重构实现钢铁行业低碳转型[21]; 也有研究从出口产业技术创新角度指出, 钢铁行业在碳中和目标约束下, 需要通过技术升级与产品结构调整协同推出口低碳化转型[22]; 崔志峰等从趋势研判角度指出低碳化与高端化将成为未来钢铁产业演进的主要方向[23]。但总体而言, 现有研究仍缺乏将技术路径、贸易结构与制度变量纳入统一分析框架的实证研究。

目前还比较缺乏从出口结构视角解构钢铁产品的出口隐含碳的研究, 但是在其他产品领域, 已有研究采用结构演化视角分析出口贸易调整及其经济影响[24], 为本文从结构层面研究钢铁出口隐含碳变化

提供了方法上的参考。此外，相关研究也从制度变革视角探讨了区域政策对经济高质量发展的影响[25]，为本文从制度环境角度讨论出口结构调整提供了启示。

现有文献为理解钢铁行业减排路径、出口结构演化及 CBAM 政策影响提供了重要基础，但仍存在三方面不足：一是缺乏产品层面出口隐含碳结构来源的系统识别；二是缺少对规模效应与结构效应的可分解分析；三是对钢铁电商等数字化制度因素多停留于机制讨论，缺乏量化检验。本文正是针对上述不足，从产品结构出发，引入 LMDI 分解方法与制度机制视角加以补充。

1.3. 研究方法、内容与创新点

1.3.1. 研究目标与方法

本文的研究目标是从数量与结构的双重视角，系统分析中国对欧盟钢铁出口中隐含碳排放的演变规律与驱动机制，揭示不同阶段隐含碳变化背后的经济、技术与政策逻辑。

为了实现上述研究目标，本文综合运用结构指标测度、LMDI 分解等多种方法。整个研究过程遵循“数据构建 - 结构分析 - 机制分解”的逻辑顺序，形成以量化分析为核心、理论解释为支撑的技术路线，确保研究的系统性与科学性。

1.3.2. 创新点与研究价值

本文的贡献主要体现在三个方面：一是从产品层面系统测算中国对欧钢铁出口隐含碳排放及其结构特征，弥补了现有研究中对出口结构关注不足的问题；二是通过将 HHI 与 LMDI 方法相结合，区分规模变化与结构调整在隐含碳演化中的相对作用，从而更准确地识别贸易低碳转型的动力来源；三是从贸易制度与产业组织视角补充解释出口结构低碳化的形成机制，将钢铁电商纳入视野，为理解结构效应的形成条件提供制度层面的解释。

2. 中国钢铁出口、隐含碳与钢铁电商的概念与理论基础

2.1. 钢铁电商的定义及功能

钢铁电商是指以互联网与数字平台为依托，以钢铁产品及相关工业品为主要交易对象，通过在线信息发布、价格撮合、订单管理、支付结算、物流协调和售后服务等功能，实现钢铁产品交易与供应链服务数字化的平台型商业模式。

从贸易结构视角看，钢铁电商通过降低信息不对称、压缩交易成本、强化质量与合规信息披露，可能影响不同类型钢铁产品在国际市场上的相对竞争力。尤其在碳约束不断强化的背景下，平台若能够嵌入碳足迹披露、认证与合规模块，将有助于降低低碳产品的市场准入成本，提高其在国际市场中的可识别性与匹配效率，从而推动出口结构由高碳产品向中低碳、高附加值产品转型。因此，钢铁电商平台不仅是交易中介，更逐渐演化为产业组织与资源配置的重要载体。

2.2. 对欧钢铁出口贸易的界限划分

钢铁产业作为典型的资源密集型与能源密集型行业，其国际贸易涉及的界限划分在广义上十分复杂。传统上，钢铁出口贸易涵盖了从低附加值的粗钢、半成品(钢坯、钢锭)，到高附加值的成品钢材(如各种板材、棒线材、管材)及合金钢等多个产品层次。

在本研究中，为了实现数据与新兴环境标准的匹配，因此采取了以政策驱动的特定界限：钢铁出口贸易的统计范围严格依据欧盟 CBAM 官方指南于 2023 年规定的碳排放默认值所列产品目录进行界定，共覆盖了 200 余种产品，具体见表 1。这种界定方式兼顾了产品间能耗差异与碳排放强度差异，使得出口数据能够与碳排放核算体系相匹配，为后续隐含碳测算提供统一口径，以下为官方指南列出的钢铁产品

具体编码目录。需注明的是，CN 编码是在 HS 六位编码基础上由欧盟进一步细分形成的八位编码，前六位与 HS 编码完全一致，用于更精细地反映欧盟贸易统计和政策监管需要。

Table 1. Code list for steel products exported to the European Union

表 1. 对欧出口钢铁产品编码表

CN 代码	产品描述
72	钢铁(不包括 72022、72023000、72025000、72027000、72028000、72029100、72029200、72029300、720299、72029910、72029930、72029980、7204)
26011200	已烧结的铁矿砂及其精矿，不包括焙烧黄铁矿
7301	钢铁板桩，不论是否钻孔、打眼或组装；焊接的钢铁角材、型材及异型材
7302	铁道及电车道铺轨用钢铁材料
730300	铸铁管及空心异型材
7304	无缝钢管及空心异型材(铸铁的除外)
7305	其他圆形截面钢铁管，外径超过 406.4 毫米
7306	其他钢铁管及空心异型材
7307	钢铁管子附件
7308	钢铁结构体(税号 9406 的活动房屋除外)及其部件
730900	盛装物料用的钢铁罐、柜、罐、桶及类似容器(装压缩气体或液化气体的除外)，容积超过 300 升
7310	盛装物料用的钢铁柜、桶、罐、听、盒及类似容器(装压缩气体或液化气体的除外)容积不超过 300 升
731100	装压缩气体或液化气体用的钢铁容器
7318	钢铁制的螺钉、螺栓、螺母、方头螺钉、钩头螺钉、铆钉、销、开尾销、垫圈(包括弹簧垫圈)及类似品
7326	其他钢铁制品

2.3. 隐含碳的基本概念与核算原理

隐含碳是指产品在生产、加工及运输等环节中所消耗能源所产生的间接碳排放。与直接排放不同，它反映了一个国家通过国际贸易“输出”或“输入”的碳排放责任。

隐含碳问题的研究与国际经济学中的“污染避难所假说”和“环境库兹涅茨曲线”(等理论密切相关。前者指出，发达国家可能通过贸易将高碳产业向发展中国家转移，从而在统计上“降低”本国排放水平；后者则揭示经济发展与环境污染之间的非线性关系。

欧盟 CBAM 政策的提出正是在这一理论逻辑下形成的，其核心目的是防止碳泄漏、维护碳约束下的公平竞争，同时推动贸易伙伴加快绿色转型。

对出口产品而言，其隐含碳核算公式通常表示为：

$$C_i = Q_i \times EF_i$$

其中， C_i 表示第 i 种产品的隐含碳排放量， Q_i 为出口数量， EF_i 为产品单位碳排放因子(或碳排放默认值)。

当对所有出口产品进行加总时，可得出出口隐含碳总量：

$$C = \sum_i Q_i \times EF_i$$

该指标能够综合反映出口结构、生产能效与技术水平的差异。因此，隐含碳分析不仅是一种贸易统计工具，更是衡量国际贸易环境绩效的重要方式，可用于识别钢铁贸易活动中的“碳泄漏”与“隐性排放转移”问题。

3. 中国钢铁出口贸易、隐含碳排放及钢铁电商发展现状

3.1. 中国钢铁出口贸易概述

中国作为全球最大的钢铁生产国和出口国，其钢铁出口贸易在全球市场中占据着举足轻重的地位，深刻影响着国际供需平衡。

从出口规模来看，中国的钢材出口量长期位居世界第一，但在不同时期表现出显著的波动性。本世纪初至 2016 年前后，中国钢材出口曾达到历史高峰。随后几年，受国内供给侧结构性改革、环保政策趋严以及全球贸易环境变化的影响，出口总量一度回落。然而，近年来，由于国内房地产市场需求持续疲软、钢铁价格优势明显以及部分海外市场(如东南亚、中东和印度)需求复苏，中国钢材出口再次展现出强大的韧性。特别是在 2023 年，钢材出口量同比实现大幅增长，创下近年来的新高，成为缓解国内产能压力的重要渠道。

3.2. 钢铁贸易中的隐含碳

隐含碳的概念前文已经提过，中国钢铁行业长期以来是国内能源消耗和隐含碳排放的重要来源，其碳排放量约占全国工业部门排放总量的 15%~20%，在制造业各行业中居首位。随着中国钢铁产品的大规模出口，出口贸易环节也成为隐含碳转移的重要渠道。

中国钢铁出口产品结构的变化是行业低碳化转型的重要体现。2005~2014 年，中国钢铁出口以高能耗、高排放的初级钢铁产品为主，如钢坯、热轧卷板、棒线材等，这些产品在生产环节碳排放强度高、附加值低、技术含量有限。据欧盟 CBAM 官方碳排放默认值计算，热轧板和钢坯等高碳组产品的平均碳排放强度超过 2.8 tCO₂/t 钢，是镀锌板、不锈钢等低碳产品的两倍以上。此阶段，中国钢铁出口以规模扩张为特征，主要依赖低成本优势占领国际市场，隐含碳排放总量随出口量同步上升。

出口碳排放强度(即单位出口量所对应的隐含碳排放)是衡量钢铁出口低碳化水平的重要指标。从长期趋势看，中国钢铁出口碳排放强度总体呈下降态势，但阶段性差异显著。据估算，2024 年中国钢铁出口的加权平均碳排放强度已降至 1.9 tCO₂/t 钢左右，较 2005 年下降约 27%，说明钢铁出口产品整体向低碳化方向演进。

值得注意的是，出口碳强度的下降并非完全依赖技术进步。由于 CBAM 试运行在即，中国钢铁企业为适应欧盟的碳核算体系，主动调整出口产品结构，增加低碳产品比例、减少高碳产品份额，这种“结构性减排”将对碳强度下降贡献显著。

3.3. 钢铁电商的发展状况

随着数字经济的快速发展和产业互联网的不断深化，钢铁行业的交易方式正在由以线下合同制和经销制为主的传统模式，逐步向以平台为载体的数字化交易模式转型。钢铁电商作为钢铁产业与信息技术深度融合的产物，近年来在中国迅速发展，并逐渐形成以撮合交易、现货交易和供应链服务为核心功能的产业平台体系。钢铁电商平台通常整合了信息发布、在线报价、订单撮合、支付结算、物流协调和信用评价等功能，使钢铁产品的交易过程由高度依赖人工谈判与关系网络的线下模式，转变为更加透明、标准化和可追溯的线上流程，从而显著降低了信息不对称和交易摩擦。

在绿色转型背景下，钢铁电商的发展还呈现出与低碳要求相结合的趋势。随着碳排放核算与环境合

规逐渐成为跨境贸易的重要约束条件，部分平台开始尝试将碳足迹信息、环境认证与产品信息相结合，探索将排放信息纳入交易流程与平台标准之中。尽管这一实践仍处于起步阶段，但其方向表明钢铁电商正逐步由“效率导向平台”向“规则导向平台”转型，在降低交易成本的同时，也可能在推动产业低碳化和结构升级方面发挥更为重要的作用。

4. 出口结构低碳化的制度机制讨论

本章从制度与市场组织视角讨论可能影响出口结构调整的因素，并以钢铁电商为例说明平台化交易模式如何为低碳产品扩张提供条件。

第一，钢铁电商提高了信息透明度和匹配效率，使产品规格、质量标准和碳排放信息更容易被披露、搜索与比较，从而提高低碳产品在国际市场中的可识别性与成交概率，缓解信息不对称对结构调整的抑制。

第二，钢铁电商降低了市场准入门槛，通过标准化交易流程与认证对接，降低企业在营销、谈判和合规方面的固定成本，使更多中小企业能够参与出口，从而扩大中低碳产品的供给基础，提升结构多样性。

第三，钢铁电商强化了价格透明度与产品差异化，使低碳属性逐步成为影响交易的重要因素，从而改变传统贸易中单一价格竞争对高碳产品的保护效应。

第四，钢铁电商将碳排放信息嵌入交易流程，使碳排放由隐性成本转为显性约束，提高高碳产品的相对交易成本，增强市场对高碳产品的筛选压力。

上述机制共同作用，使低碳产品的进入成本下降、市场可达性提高，而高碳产品的相对成本上升，从而推动出口结构由高碳集中向多元低碳化方向调整。

综合来看，钢铁电商并不直接决定出口隐含碳排放水平，但可能通过改变交易制度与信息结构，间接影响不同碳强度产品的相对竞争力。具体而言，平台化交易有助于提高价格与产品信息透明度，降低中小企业进入国际市场的固定成本，并将碳排放、认证等信息嵌入交易流程，从而可能在一定程度上改善低碳产品的市场可达性，同时提高高碳产品的相对合规成本。上述机制为理解出口结构由“高碳集中”向“多元低碳化”演进提供了一种制度层面的解释视角。

5. 出口隐含碳的测算及因素分解分析

5.1. 研究总体思路与分析框架

正如第四章所论证的，出口结构的低碳化并非自然发生，而是受到信息透明度、市场准入条件、价格形成机制以及碳合规约束等制度性因素的共同影响。钢铁电商通过重塑贸易制度与信息结构，为低碳产品扩大市场份额提供了潜在条件，但这一作用是否已经在现实出口结构中得到充分体现，仍存在不确定性。基于此，本章从定量角度出发，对中国对欧盟钢铁出口的隐含碳排放水平及其结构演化进行系统测算，并进一步分解其变化来源，以回应第三章提出的结构调整机制。

本文基于欧盟 CBAM 文件公布的 270 余种钢铁产品碳排放默认值(目前欧盟官方只公布了此版本碳排放默认值，故仅以此为参考)，采用均值法，把 270 余种出口产品分为高碳、中碳、低碳三种组别，并与 2005~2024 年中国对欧盟出口统计数据进行匹配(数据来源于 Comtrade 联合国商品贸易数据库)，测算出口隐含碳总量与加权碳强度。然后运用 Herfindahl-Hirschman 指数(HHI)衡量出口结构集中度，识别高、中、低碳组产品在出口份额中的动态变化。再次，采用对数平均迪氏指数分解(LMDI)模型，将出口隐含碳变化分解为规模效应与结构效应(即后文提到的碳效率效应)两部分，揭示不同阶段的出口隐含碳变化主要驱动因素。

5.2. 出口隐含碳测算——基于 HHI 指数

第四章指出, 钢铁电商可能通过改变不同类型钢铁产品的相对交易成本与市场可达性, 从而推动出口结构由高碳集中向多元低碳化转型。为检验这一结构调整是否在现实出口中得到体现, 本文首先利用 HHI 指数从结构层面刻画中国对欧钢铁出口在不同碳排放等级之间的集中度变化及其时间演化特征。

HHI 指数(Herfindahl-Hirschman Index, 赫芬达尔 - 赫希曼指数)是一种常用来衡量市场集中度的指标, 主要用于分析某一行业中市场竞争的程度。HHI 的计算公式为:

$$HHI = \sum_{i=1}^n s_i^2$$

其中, s_i 表示第 i 家企业在该市场中的市场份额(通常以百分比或小数形式表示), n 表示市场中所有企业的数量。通常 HHI 值越大, 表明市场越集中、竞争越弱, 反之市场则越分散、竞争越充分。

在本研究中, HHI 指数(Herfindahl-Hirschman Index)被引入以衡量中国对欧盟钢铁出口的结构特征及其变化趋势。具体而言, HHI 在本文中的含义是: 通过出口产品的份额分布, 衡量中国钢铁出口在不同碳排放等级(高碳组、中碳组、低碳组)之间的结构集中度。当 HHI 值较高时, 说明出口集中于少数高碳产品, 出口结构较为单一, 意味着整体出口结构的碳排放水平相对较高; 反之, 当 HHI 值较低时, 出口分布更加均衡, 表明出口结构趋向多元化与低碳化。因此, HHI 的变化不仅能够反映出出口结构的演变方向, 也间接揭示了中国钢铁出口碳排放强度的结构性变化。在本研究中, HHI 既作为出口结构变化的统计测度工具, 也作为分析隐含碳排放结构优化程度的重要指标, 与下一章节即将分析的 LMDI 分解结果相结合, 用以诊断不同时期碳排放变化的结构性来源。出口集中度(即总体 HHI)的计算公式如下:

$$HHI_t^{\text{total}} = \sum_i \left(\frac{Q_{i,t}}{\sum_i Q_{i,t}} \right)^2$$

其中, $Q_{i,t}$ 表示第 t 年第 i 种钢铁产品的出口量, $\sum_i Q_{i,t}$ 为该年度出口总量。HHI_t^{total} 值越大, 出口集中度越高, 结构越单一; 反之, 结构越分散, 出口越多元化。

此外, 为了识别不同碳排放档次产品的结构差异, 本文计算了组间 HHI (隐含碳排放集中度), 即以高碳组、中碳组、低碳组三个类别为单位, 计算其在总出口中的份额平方和, 用于反映碳结构层次的变化, 基本计算公式为:

$$HHI_t^{\text{group}} = \sum_{g \in \{H, M, L\}} \left(\frac{\sum_{i \in g} Q_{i,t}}{\sum_i Q_{i,t}} \right)^2$$

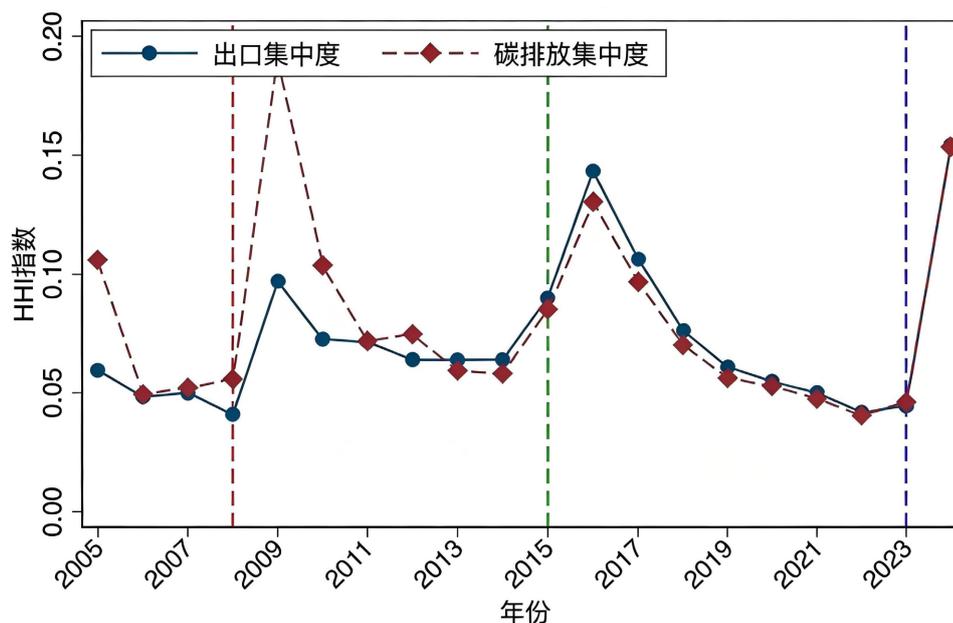
其中, g 表示碳排放等级组(High, Medium, Low), $\sum_{i \in g} Q_{i,t}$ 表示该年碳档 g 的出口总量。当组间 HHI 下降时, 说明高碳产品占比下降、出口结构更趋平衡, 低碳化趋势增强; 当组间 HHI 上升时, 则表明高碳组产品主导地位增强, 出口结构碳密集化。为便于比较, 本文将所有所得 HHI 指数均乘以了 100 进行标准化处理。

同时, 为揭示出口结构的动态演变趋势, 还计算三类碳档的出口份额:

$$w_H = \frac{Q_{H,t}}{Q_t}, \quad w_M = \frac{Q_{M,t}}{Q_t}, \quad w_L = \frac{Q_{L,t}}{Q_t}$$

三者相加为 1, 其中, Q_t 为该年度钢铁产品出口总量。三个份额的变化可反映出出口结构的碳强度分布演化。

接下来为 HHI 的具体测算结果:



垂直虚线标注: 2008金融危机, 2015供给侧改革, 2023 CBAM试运行

Figure 1. Trend chart of overall HHI and inter-group HHI

图 1. 总体 HHI 与组间 HHI 趋势图

图 1 展示了 2005~2024 年中国对欧盟钢铁出口结构集中度(总体 HHI)与碳排放集中度(组间 HHI)的变化趋势。总体来看,两者在时间序列上具有较高一致性,但不同阶段的波动特征及其影响因素存在明显差异:

(1) 2005~2008 年: 结构稳定期, 碳集中度高位波动

该阶段产品组合较为固定,高碳钢材出口占比长期居高,总体 HHI 曲线维持在相对高位。受金融危机外需冲击影响,2008 年组间 HHI 曲线出现快速抬升,体现了危机情境下出口结构的“惯性集中”特征。

(2) 2009~2014 年: 危机复苏期, 出口集中度与碳集中度分化

金融危机后,传统高碳钢材出口短时回升,刺激组间 HHI 曲线阶段性走高;但同时大量中碳制品扩大出口份额,总体 HHI 曲线逐步下降,呈现“产品层面分散-碳层面集中”的结构错位现象。这反映出市场需求回暖过程中仍受制于生产结构与能效差异的影响。

(3) 2015~2022 年: 低碳转型期, 结构优化显著

随着供给侧结构性改革推进,高能耗与过剩产能加速出清,高碳钢材出口规模收缩,总体 HHI 曲线与组间 HHI 曲线均进入持续下降通道。这表明出口结构从依赖规模扩张逐步转向质量提升与低碳化方向,呈现“结构改善主导”的绿色转型特征。

(4) 2023~2024 年: CBAM 试运行冲击下的“应激式集中”

随着欧盟 CBAM 进入试运行阶段,部分企业为提前锁定成本优势而加大高碳产品向欧出口,结构集中度短期显著反弹。该变化反映出政策压力下企业出口决策的滞后性与风险规避行为,提示短期内仍可能存在逆向高碳冲击。

总体而言,两条曲线的变化反映出危机后市场适应与产业转型双重驱动下的结构错位效应,即出口企业在维持竞争优势的同时,也在被动实现低碳化结构调整。

图 2 为三档(高碳、中碳、低碳)产品出口份额的堆叠面积演变图,其走势与图 1 相似。从结构上看,高碳组长期占据主导地位,但整体上其份额呈缓慢下降趋势:2007~2009 年因金融危机,导致国际需求减

弱而下降，2009~2015 年随着国内产能扩张短暂回升，2015 年后持续下降。中碳组份额逐年上升，并在近年逐步超过低碳组，显示出口结构重心由高碳向中碳过渡。低碳组份额虽保持较小比例，但总体稳定，说明低碳产品出口能力尚未形成规模优势。其次，通过图表可以明显观察到 2023 年三组产品的份额出现了剧烈变化，其原因与图 2 的变化一致，即欧盟 CBAM 进入试运行阶段，可能企业普遍预期未来将增加碳成本，因此，为了在正式征收前“抢出口”，导致部分中国钢铁企业集中出口尚未被完全限制的高碳产品，以锁定短期市场份额。

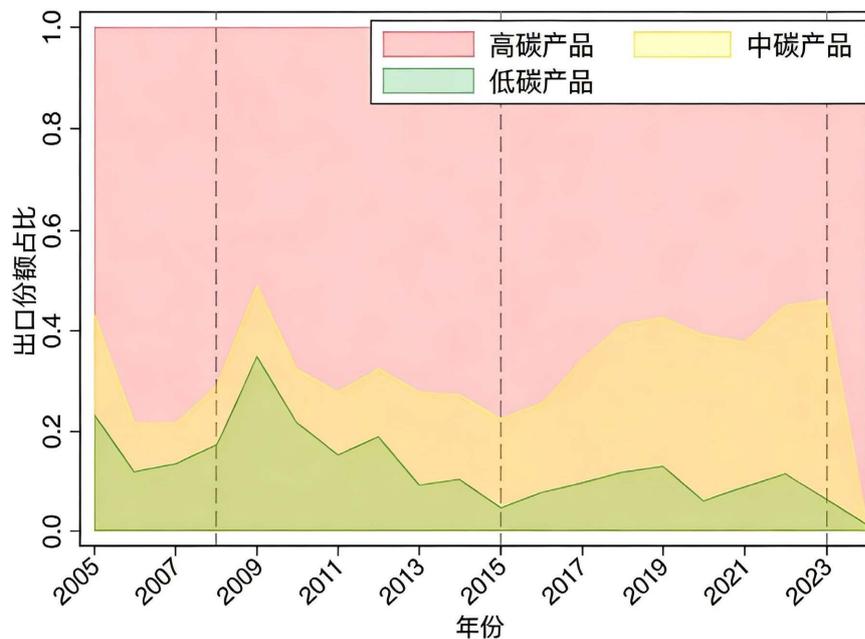


Figure 2. Evolution of stacked area of carbon intensity structure for steel export products
图 2. 钢铁出口产品碳强度结构堆叠面积演变

三档结构的动态演化表明，中国钢铁出口结构的低碳化方向已确立，但不同碳档之间的调整节奏并不均衡：高碳产品退出较快，而低碳产品替代能力仍显不足，中碳产品成为过渡阶段的主要出口力量。

通过对 2005~2024 年中国对欧盟钢铁出口的 HHI 指数测算可以发现，出口结构的集中度总体呈下降趋势，反映出中国钢铁出口正在由高碳集中逐步向多元低碳化转型。总体 HHI 与组间 HHI 的变化表明，碳排放分组差异是出口集中度变化的主要来源；其中，高碳组虽长期占据主导地位，但其份额持续下降，而中低碳产品比重稳步提升，出口结构优化趋势渐显。总体而言，HHI 测算结果说明中国钢铁出口结构的低碳化调整已初具成效，钢铁电商从理论上讲仍有较大的发展空间。

5.3. 出口隐含碳排放的 LMDI 分解分析

尽管 HHI 结果表明出口结构存在低碳化调整趋势，但第四章的理论分析指出，制度约束与路径依赖可能使结构效应难以在短期内成为主导力量。因此，有必要进一步区分出口隐含碳变化究竟是由出口规模调整主导，还是由出口结构优化主导。为此，本文引入对数平均迪氏指数法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)，对出口隐含碳变化来源进行分解，将其拆解为规模效应与结构效应两部分，从而定量识别不同阶段出口隐含碳变化的主要来源与贡献。

该方法能够有效分离不同因素对总碳排放变化的贡献，并避免残差项影响，在能源与碳排放研究中被广泛应用。

5.3.1. 数据来源与公式说明

本文的研究对象依然为 2005~2024 年中国对欧盟出口的 270 余种钢铁产品，各产品的单位碳排放系数(I_i)采用欧盟 CBAM 文件 2023 年版提供的钢铁产品碳强度默认值，在样本期间(2005~2024 年)视为固定不变，从而消除数据口径差异造成的误差。

出口数据采用产品层面年度出口数量(以吨计)，并按照碳排放强度水平划分为三类：高、中、低碳组。基于这一分组，可以分别计算各碳组年度出口量、出口份额及出口加权平均碳强度。由此，出口隐含碳排放总量(C_t)两因子式为：

$$C_t = \sum_i Q_{i,t} \times I_i$$

其中， $Q_{i,t}$ 为第 i 种钢铁产品在 t 年的出口量， I_i 为该产品的碳排放系数。进一步地，通过计算各产品出口份额 $S_{i,t} = Q_{i,t} / Q_t$ ，可获得各年份出口结构的碳排放分布。

在此基础上，LMDI 分解法被用于对该乘法关系进行对数分解，以实现碳排放变化的可加性分解。对应的 LMDI 模型可写为：

$$\Delta C = \underbrace{\sum_i L(C_{i,t}, C_{i,0}) \ln \left(\frac{Q_t}{Q_0} \right)}_{\text{规模效应}} + \underbrace{\sum_i L(C_{i,t}, C_{i,0}) \ln \left(\frac{S_{i,t}}{S_{i,0}} \right)}_{\text{结构效应}}$$

规模效应(Scale Effect)衡量出口总量变化对隐含碳排放的影响，结构效应(Structure Effect)反映不同碳排放等级产品在出口结构中份额变化对隐含碳排放的贡献。 $L(C_{i,t}, C_{i,0})$ 为对数平均函数，用以保证分解的无残差特性。

为消除价格波动和汇率变动等非数量性因素的干扰，本文统一采用物理量(吨)作为计算基础，并以 2005 年为基期，对 2005~2024 年间的出口隐含碳变化进行逐年与首末年分解分析。

5.3.2. 分解结果与分析

在开展 LMDI 分解前，有必要首先从总体上考察中国对欧盟钢铁出口的碳排放强度变化趋势，以揭示出口减碳过程的宏观特征。由于不同钢铁产品之间的能耗与碳排放系数差异较大，单纯观察总排放量难以反映实际低碳化水平的改善情况。为此，本文基于各年度出口产品数量及其对应的碳排放默认值，计算出口加权平均碳强度(简称 \bar{I}_t)，以衡量单位钢铁出口隐含碳排放水平。

出口加权平均碳强度的计算公式如下：

$$\bar{I}_t = \frac{\sum_i Q_{i,t} \times I_{i,t}}{\sum_i Q_{i,t}}$$

其中， $Q_{i,t}$ 表示第 i 种钢铁产品在年份 t 的出口量(吨)， $I_{i,t}$ 表示该产品的碳排放默认值(tCO_2/t)。分子部分代表当年所有产品的出口隐含碳总量，分母为出口总量，故 \bar{I}_t 可视为各产品碳排放强度按出口比重加权的結果。该指标能够综合反映出口产品结构调整与技术进步对整体碳排放效率的影响。

如图 3 所示，2005~2024 年中国对欧盟钢铁出口的加权平均碳强度呈现显著的波动下降趋势。2005 年至 2009 年间碳强度快速上升，是因为全球金融危机前欧盟市场需求旺盛，中国钢铁出口以高碳初级产品为主，导致碳强度明显攀升；在 2008 年达到阶段性峰值(约 $1.63 \text{ tCO}_2/\text{t}$)，随后进入持续下降调整阶段，这个时期的变化是因为受金融危机影响，国际市场需求收缩及后续国内供给侧改革和节能减排等政策的推动，出口结构开始优化，故碳强度显著下降；到 2024 年，由于绿色生产技术普及、行业能效提升及欧盟 CBAM 政策倒逼效应叠加，使出口产品结构向低碳高附加值方向转型，导致碳强度降至约 $1.17 \text{ tCO}_2/\text{t}$ ，累计下降约 28%。

总体来看, 中国对欧盟钢铁出口的加权平均碳强度总体下降趋势表明, 钢铁行业的绿色转型与出口结构优化已取得实质进展。出口产品的碳排放效率持续提升, 反映出国内节能减排政策、清洁生产技术推广以及国际绿色贸易壁垒共同作用的结果。该趋势为后续 LMDI 分解提供了定量基础, 也验证了中国钢铁出口低碳化的长期方向性。

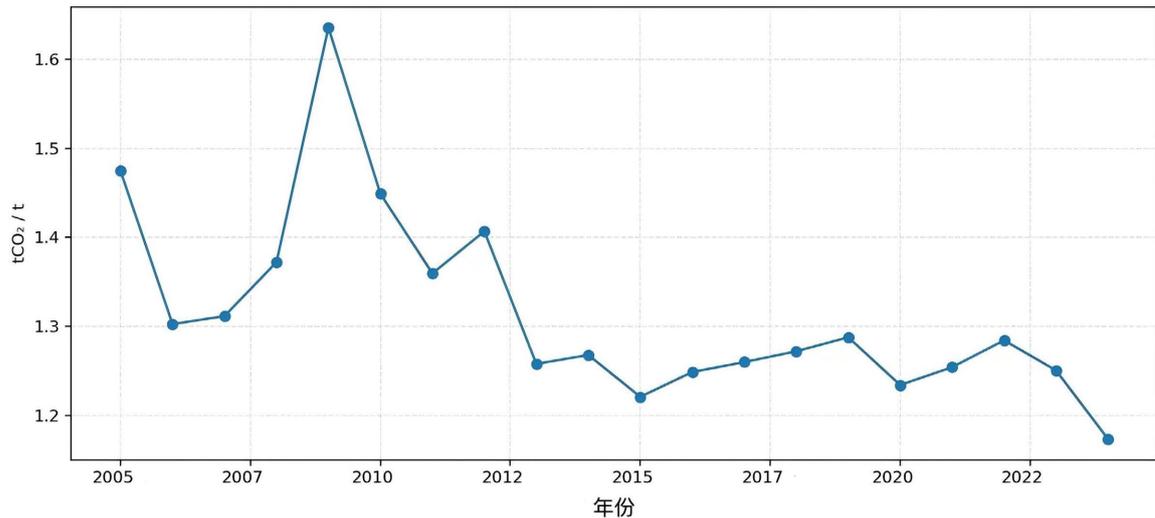


Figure 3. Trend chart of export-weighted average carbon intensity
图 3. 出口加权平均碳强度趋势图

在前文出口加权碳强度趋势分析的基础上, 为进一步揭示中国对欧盟钢铁出口隐含碳排放变化的驱动机制, 本文利用 LMDI 模型对 2005~2024 年间的隐含碳变化进行首尾年分解, 将其拆解为规模效应(出口总量变化对隐含碳的影响)与结构效应(即不同碳强度产品占比的变化对隐含碳的影响)两类因素。前者反映出口总量变化对隐含碳排放的影响, 后者体现出口结构优化对排放水平的贡献。该分解有助于区分“量变”与“质变”在低碳转型中的相对作用, 为判断中国钢铁出口减碳的内在逻辑提供一定得依据。

如图 3 所示, 2005~2024 年中国对欧盟钢铁出口隐含碳排放总体呈下降趋势, 分解结果显示两项效应均表现为负值。其中, 规模效应贡献-129.1 万吨 CO₂, 占比约 71%, 表明研究期内中国对欧盟钢铁出口规模整体收缩, 是隐含碳减排的主要驱动力。自 2010 年起, 中国钢铁出口受国际市场波动、欧债危机及贸易壁垒等因素影响, 出口总量增长趋缓, 尤其在 2015 年后, 国内产能调整政策与碳约束机制强化, 使得出口量减少显著抑制了总隐含碳水平。

与此同时, 结构效应贡献-51.8 万吨 CO₂, 占比约 29%, 同样在碳减排方向上发挥作用。其作用机制主要体现在出口产品内部结构的优化, 即高碳排放钢材(如初级钢坯、热轧板)的比重下降, 而中低碳产品(如高强度合金钢、冷轧成品)份额上升。这种出口结构的改善与欧盟市场对绿色低碳产品需求上升、以及 CBAM 政策导向密切相关。可以认为, 结构效应反映了中国钢铁产业由数量扩张向质量提升、由高耗能产品向高附加值与低碳产品转型的过程。

总体而言, 两因子分解结果表明, 中国对欧盟钢铁出口隐含碳排放的减少是规模收缩与结构优化共同作用的结果, 其中规模效应对总变化的贡献更为突出, 体现为出口总量收缩(或增速放缓)对减排的主导作用。首末年视角凸显了钢铁出口碳减排的长期净效应, 与后续的年度分解能够相互印证。

为了更直观地呈现规模效应与结构效应对出口隐含碳排放的持续影响, 本文对 2005 年以来两因子的年度变化进行了累积求和处理, 并绘制了其累计贡献轨迹, 如图 4 所示。总体来看, 规模效应与结构效应的累计变化方向一致, 二者共同推动了中国对欧盟钢铁出口隐含碳排放的总体下降。

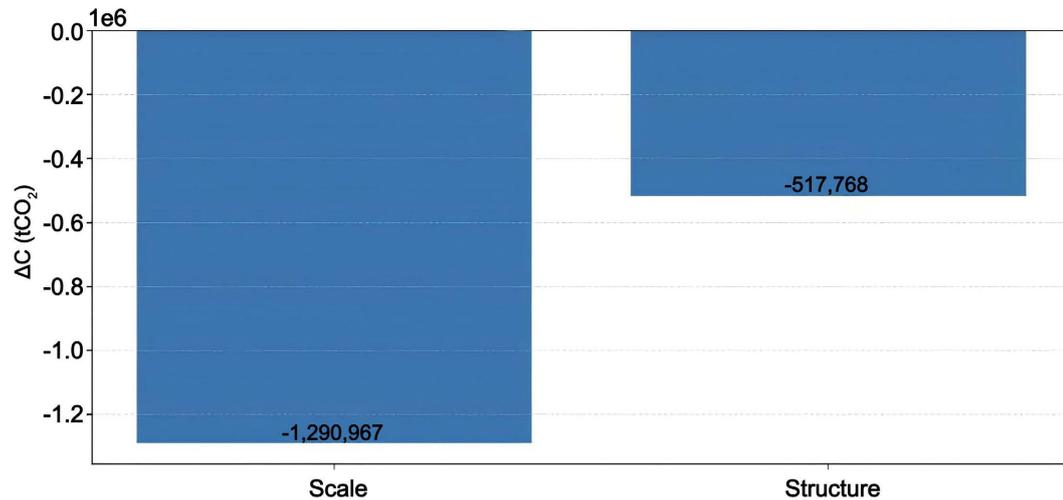


Figure 4. Two-factor decomposition chart of initial and final years
图 4. 首尾年两因子分解图

具体来看，规模效应曲线始终位于结构效应之上，说明出口总量变化是引发碳排放波动的主要驱动力。规模效应的累积贡献呈稳定下降态势，这表明随着对欧盟出口规模的收缩，中国钢铁出口的总隐含碳排放减少显著。结构效应曲线虽然幅度较小，但走势大体与规模效应保持一致，并在部分年份呈现边际加速特征，反映出出口结构优化在不同阶段的积极作用。特别是在 2015 年后和 2023 年后，结构效应的下降斜率相较其他时期而言明显增大，表明低碳产品比重提升成为新的减排推动因素。

从整体趋势看，规模效应的作用体现为“量减”，而结构效应的贡献反映“质优”；两者叠加使得累计总效应曲线持续下降，说明中国钢铁出口的减碳过程是由数量调整与结构优化协同驱动的。这一结果验证了中国钢铁行业在对欧出口中逐步实现从高碳规模扩张向低碳出口转型的路径，也为后续欧盟碳边境政策下我国钢铁产品出口竞争力的可持续性提供了一定的经验依据。

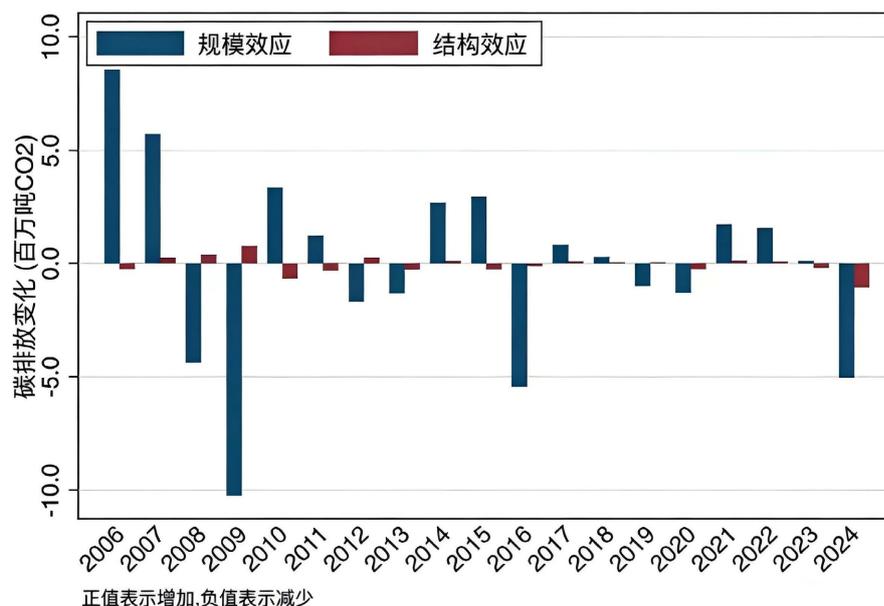


Figure 5. Cumulative contribution trajectory of two factors to export embodied carbon changes
图 5. 出口隐含碳变化两因子累计贡献轨迹

通过观察 2005~2024 年出口钢铁隐含碳变化的两因子累计贡献轨迹图(见图 5),可以清晰地识别出钢铁出口隐含碳变化的主要驱动机制。从结果来看,规模效应在整个研究期间始终是决定隐含碳排放增减的主要来源,其波动幅度远大于结构效应。在 2006~2008 年外需旺盛期,钢铁出口规模快速扩张,规模效应推动隐含碳排放显著增加,而 2009 年在全球金融危机影响下,出口需求骤降,规模效应强力转负,并成为全周期最显著的减排驱动因素。随着 2015 年供给侧结构性改革的推进,高耗能与低附加值产能逐步出清,规模扩张受到抑制,规模效应的变化趋于收敛并在多数年份贡献减排。但在 2023 年欧盟 CBAM 试运行背景下,出口端出现前置布局与订单抢跑行为,规模效应重新转为正值并推高出口隐含碳排放。相较之下,结构效应贡献相对有限,虽然在多数年份呈现负向作用,但对碳减排的推动更趋温和,反映出口结构低碳化的动力虽在强化,但尚不足以压倒规模扩张的排放压力。

上述分解结果与第四章的理论分析有所呼应,即在现有贸易制度与产业结构条件下,出口隐含碳变化仍主要由规模调整驱动,而结构优化的作用尚处于待强化过程中。

6. 结论与政策建议

本文基于 2005~2024 年中国对欧盟钢铁产品出口数据及欧盟 CBAM 规定的产品碳排放默认值,构建产品层面的出口隐含碳核算体系,结合 HHI 指数与 LMDI 分解方法,系统分析了中国对欧钢铁出口隐含碳排放的结构特征及其驱动机制,并从理论上引入钢铁电商这一新型贸易形态,探讨其在出口低碳转型中的潜在作用。

研究表明:第一,中国对欧钢铁出口结构集中度总体呈下降趋势,高碳产品占比虽仍较高,但中低碳产品比重逐步上升,出口结构正由“高碳集中型”向“多元低碳化”方向演进。第二,LMDI 分解结果显示,出口隐含碳排放的变化主要由规模效应主导,结构效应发挥协同作用,说明当前出口低碳化转型仍以“量的调整”为主,“质的调整”尚未成为主导动力。第三,钢铁电商通过提高信息透明度、降低交易与合规成本,尽可能改善低碳产品的市场可达性,进而从制度层面为出口结构低碳化提供支持条件。

基于上述结论,本文提出如下政策建议:一是将出口结构低碳化纳入钢铁出口政策目标体系,通过绿色认证、财政激励等方式引导中、低碳产品出口扩张;二是在政策层面,可引导钢铁电商平台与碳核算、产品认证和 CBAM 合规体系对接,推动碳信息标准化披露,降低企业合规成本,为低碳产品出口提供更为便利的市场条件,从而在不增加行政干预强度的前提下,间接促进出口结构低碳化转型;三是加强贸易、产业与气候政策之间的协同,通过市场化与制度化手段共同引导出口结构优化。通过上述路径,有助于在保持贸易稳定的同时,实现出口结构优化与减排目标的协同推进。

参考文献

- [1] Song, X., Du, S., Deng, C., Shen, P., Xie, M., Zhao, C., Chen, C. and Liu, X. (2025) Carbon Emissions in China's Steel Industry from a Life Cycle Perspective: Carbon Footprint Insights. *Journal of Environmental Sciences*, **85**, 1189-1208.
- [2] Wang, X., Wei, Y. and Shao, Q. (2020) Decomposing the Decoupling of CO₂ Emissions and Economic Growth in China's Iron and Steel Industry. *Resources, Conservation and Recycling*, **152**, Article 104509. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104509>
- [3] Zhang, S., Yi, B., Guo, F. and Zhu, P. (2022) Exploring Selected Pathways to Low and Zero CO₂ Emissions in China's Iron and Steel Industry and Their Impacts on Resources and Energy. *Journal of Cleaner Production*, **340**, Article 130813. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130813>
- [4] Xin, H., Wang, S., Chun, T., Xue, X., Long, W., Xue, R. and Zhang, R. (2023) Effective Pathways for Energy Conservation and Emission Reduction in Iron and Steel Industry towards Peaking Carbon Emissions in China: Case Study of Henan. *Journal of Cleaner Production*, **131**, 448-459.
- [5] 华泰期货. 中国钢材出口结构分析[R]. 华泰期货专题报告, 2023.

- [6] 李新创. 新型工业化和城镇化背景下钢铁产品结构优化分析[Z]. 上海衍生品市场论坛, 2013. <https://www.shfe.com.cn/upload/20141128/1417158155538.pdf>, 2025-11-13.
- [7] 王志远. 中国钢铁产品出口情况及对策分析[J]. 北方经贸, 2025(1): 30-33.
- [8] 刘京阳. 浅析我国钢铁出口现状与发展前景[J]. 冶金管理, 2023(20): 49-51.
- [9] 郑雨豪. 中国钢铁出口现状及问题探析[J]. 全国流通经济, 2018(13): 19-20.
- [10] 李雨佳. 中国钢铁进出口贸易现状及发展对策[J]. 山西冶金, 2017, 40(3): 36-38.
- [11] 罗璇. 中美贸易摩擦对中国钢铁产品对美出口的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 首都经济贸易大学, 2020.
- [12] 周维富. “双碳”目标背景下中国钢铁工业高质量发展研究[EB/OL]. 中国社会科学网, 2023. https://www.cssn.cn/glx/glx_llsy/202507/t20250729_5907710.shtml, 2025-11-11.
- [13] 梁艳萍. 碳中和背景下我国钢铁出口产业技术创新的思考[J]. 对外经贸实务, 2022(5): 13-16.
- [14] Liu, J., Wang, W., Jiang, T., Ben, H. and Dai, J. (2025) Carbon Border Adjustment Mechanism as a Catalyst for Greenfield Investment: Evidence from Chinese Listed Firms Using a Difference-in-Differences Model. *Sustainability*, **17**, Article 3492. <https://doi.org/10.3390/su17083492>
- [15] 薄雅婕, 王文军, 谢鹏程. 欧盟碳边境调节机制对全球钢铁行业的多维影响[J]. 价格月刊, 2024(8): 79-87.
- [16] 上海建材编辑部. 钢铁出口关税、退税调整力促钢企低碳绿色发展[J]. 上海建材, 2021(4): 46-47.
- [17] 冶金财会编辑部. 以高端化重构钢铁出口新格局以低碳化应对欧盟 CBAM 新挑战[J]. 冶金财会, 2024, 43(4): 1.
- [18] 银凤. 欧盟碳边境调节机制对中国钢铁行业出口的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 商务部国际贸易经济合作研究院, 2022.
- [19] 罗芳, 刘伟, 凌晨. “一带一路”沿线国家交通基础设施质量对中国钢铁出口的影响研究[J]. 中国物价, 2021(11): 26-28.
- [20] 汤莉. 外需收缩加压中国钢铁出口[J]. 国际商报, 2023(1): 1-2.
- [21] 李晋, 谢璨阳, 蔡闻佳, 王灿. 碳中和背景下中国钢铁行业低碳发展路径[J]. 中国环境管理, 2022, 14(1): 48-53.
- [22] 张玺. 我国钢铁出口竞争力的分析[J]. 市场瞭望, 2025(4): 7-9.
- [23] 崔志峰, 上官方钦, 马文略, 李骁, 等. 双碳背景下中国钢铁行业未来发展趋势探讨[J]. 工程科学学报, 2025, 47(4): 862-874.
- [24] 王念. 程昌秀. 林耿. 中国农产品贸易结构演化及对粮食安全的影响[J]. 地理学报, 2022, 77(10): 2599-2615.
- [25] 荆浩冉, 李新英. 自贸试验区设立对区域经济高质量发展的影响——基于多期双重差分法的实证分析[J]. 科技创业月刊, 2025(10): 59-68.